המינהל למדע ולטכנולוגיה



האוניברסיטה הפתוחה
בית הספר לטכנולוגיה



מערכות בקרה ואנרגיה

מערכות חשמל

תורת החשמל


המרכז לטכנולוגיה חינוכית


בית הספר לטכנולוגיה של
האוניברסיטה הפתוחה

משרד החינוך
המינהל למדע ולטכנולוגיה



מערכות בקרה ואנרגיה

מערכות חשמל

תורת החשמל

ספר זה מוקדש לזכרו של **ד"ר יעקב גל,**
פיזיקאי ומחנך, שספריו תרמו רבות לחינוך
המדעי-טכנולוגי של התלמידים במדינת ישראל.

ספר זה מבוסס על מהדורות קודמות של ספרים בתורת החשמל, שיצאו לאור בהוצאה זו.

כתיבה ועריכה מדעית
ד״ר יעקב גל - ז״ל
משה קלרטג
תלמה מוקדי

ייעוץ אקדמי ודידקטי
שאול איתי
ישראל בלוך
שלמה בן-טולילה
פרופ׳ שלמה וקס
ישראל זילברשטיין
ראובן כלב
אבי לופו
פרופ׳ מאיר מידב
ד״ר משה מודריק
צבי סנדר
צבי פופקו
רינה קושניר
פליציה קלרמן
יעקב שינבוים

קריאה והערות
דדי ארנסט
שמחה גילעם
שאול זרצקי

הפקה
אביבה אבידן

איורים
רונית בורלא

עיצוב עטיפה
ירמי לז׳ה

מק״ט 1043701


המרכז לטכנולוגיה חינוכית
בית הספר לטכנולוגיה של
האוניברסיטה הפתוחה

משרד החינוך
המינהל למדע ולטכנולוגיה



מהדורת ניסוי

בית ההוצאה לאור של המרכז לטכנולוגיה חינוכית, קרית משה רואו, רח׳ קלאוזנר 16, רמת-אביב, ת״ד 39513, תל-אביב 61394.
The Centre For Educational Technology, 16 Klausner St., Ramat-Aviv, P.O.Box 39513, Tel-Aviv, 61394. Printed in Israel.

תוכן העניינים

הקדמה

מתח וזרם, הספק, חשבון חשמל, נָתֵק וקֶצֶר, נגדים וקבלים, טור ומקביל, שדה חשמלי ושדה מגנטי, מטען חשמלי – רבים שמעו מושגים אלה, אך רק מעטים יודעים להסביר אותם. הבנת מושגים אלה – אינה הסיבה היחידה ללמוד את המקצוע **תורת החשמל**. מקצוע זה הוא מקצוע תשתית למקצועות שונים, הנלמדים במגמת **מערכות בקרה ואנרגיה**. שניים ממקצועות אלה הם "**מערכות הספק**" ו"**המרת אנרגיה**".

רק לפני מאתיים שנה בערך החלו אנשי המדע לחקור בצורה מסודרת את התופעות החשמליות, וכעבור חמישים שנה בערך גובשה תורת החשמל והמגנטיות (אלקטרומגנטיות). עד היום משתמשים בתורה זו לצרכים מעשיים רבים.

תורת החשמל והמגנטיות עוסקת בנושאים מרכזיים במדעי הטבע והטכנולוגיה. הבנת התהליכים החשמליים, שבהם עוסקת תורת החשמל והמגנטיות, כרוכה בהבנת מושגים רבים, ידיעת חוקים פיזיקליים שונים, ושליטה בטכניקות מתמטיות, המאפשרות חישובים מדויקים של תהליכים אלה. בין השאר, השימוש בתורת החשמל והמגנטיות מאפשר להגיע להישגי החשמל המוּכָּרים לנו.

החשיבות המעשית של החשמל – ברורה לכל אדם המתבונן סביבו (למשל: נורות חשמל, מקררים, מכשירי טלוויזיה ורדיו, מחשבים, טלפונים ניידים, מכונות כביסה, מכונות חשמל במפעלים). לא נגזים אפוא אם נאמר, כי החשמל נמצא במוקד הטכנולוגיה המודרנית.

* * *

ספר זה – היוצא לאור על-ידי המרכז לטכנולוגיה חינוכית; בית-הספר לטכנולוגיה של האוניברסיטה הפתוחה; והמרכז הפדגוגי-טכנולוגי של רשת "עמל" – מותאם ברמתו ובתכניו לתוכנית הלימודים החדשה במקצוע **תורת החשמל** במגמת **מערכות בקרה ואנרגיה** ולרמת בחינות הבגרות במקצוע זה.

הספר כולל דוגמאות רבות, שאלות, תרגילים וחומר העשרה. אנו מקווים כי הלומדים יפיקו את מלוא התועלת מלימוד ספר זה, ומאחלים הנאה והצלחה בלמידת נושאי הספר.

1

מטענים וכוחות חשמליים

1.1 החשמל בעבר ובהווה

הברק היה, כנראה, התופעה החשמלית הראשונה שראה האדם. במשך אלפי שנים היה הברק משהו מפחיד ומסתורי, שלא ידעו כיצד להסביר אותו. הברק השפיע על החיים של שבטים קדמונים. למשל, אם הבריק ברק כאשר התקיימה אסיפת שבט, היו מבטלים את האסיפה.

כמו שהקדמונים לא הבינו את תופעת הברק, כך הם גם לא הבינו תופעה מסתורית אחרת הקשורה בחשמל. התופעה הזו התגלתה ביוון העתיקה: אם משפשפים חומר, הנקרא **ענבר** (ביוונית: אלקטרון), הוא מושך אליו פיסות בד קטנות. את הענבר משפשפים בצמר, למשל. הענבר הוא שְׂרָף מאובן של אורן מסוים.

רק במאתיים השנים האחרונות החלו אנשי מדע לחקור בצורה מסודרת את התופעות החשמליות. הם עשו ניסויים, וניסו להסביר בצורה מדעית את התוצאות שקיבלו. כך החלו להבין את התופעות החשמליות ואת סיבותיהן.

בניסויים אלו התגלו עוד חומרים, שהתנהגו כמו הענבר; כלומר, כאשר שפשפו אותם בחומר מתאים, הם משכו אליהם פיסות בד או נייר. החוקרים קראו לחומרים אלה **חומרים טעונים במטען חשמלי**, או בקיצור: **חומרים טעונים**.

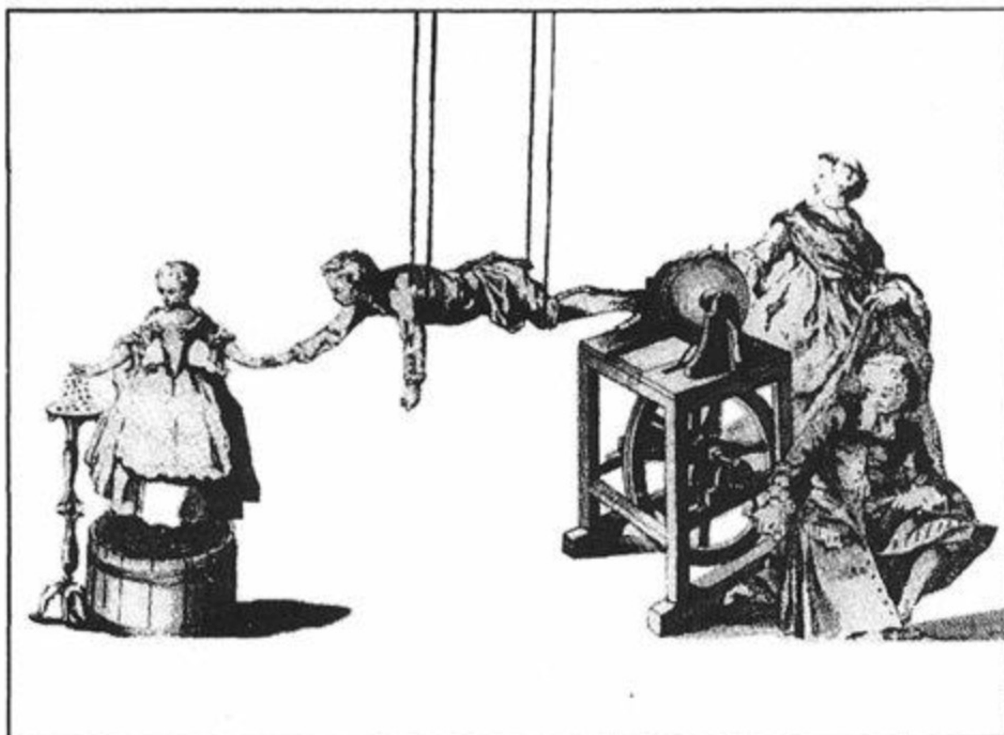
עוד מצאו אנשי המדע, שהמטען החשמלי יכול לעבור מגוף לגוף. הדבר קורה כאשר מחברים את הגופים זה לזה באמצעות מתכת; לפעמים אפילו גוף האדם יכול להעביר מטען חשמלי.

על סמך הגילויים האלה תוכננו הדגמות שונות בחשמל, ותורת החשמל הפכה במאה ה-18 לנושא מלהיב כל כך, עד שסטודנטים באוניברסיטאות התלוננו, שציבור הסקרנים תופס את כל מקומות הישיבה באולמי ההרצאות, והם עצמם אינם יכולים ללמוד חשמל...

אנשי המדע המשיכו לחקור ולערוך ניסויים רבים, עד שהבינו את עקרונות תורת החשמל, ועד שהחשמל הפך לדבר כה חשוב בחיינו ובטכנולוגיה המודרנית. היום קשה לנו לתאר לעצמנו חיים ללא חשמל. תאורה חשמלית, מכשירים ביתיים, רדיו, טלוויזיה, מחשבים, מכונות חשמליות במפעלים - כל אלה דברים שלא היינו יכולים לנצל וליהנות מהם, לולא היינו יודעים לנצל את החשמל לתועלתנו.

לא נביא כאן את תולדות התגליות בחשמל, אלא נסביר את יסודות תורת החשמל, ונלמד את עקרונות הפעולה של מכשירים חשמליים שונים. נתחיל בדבר שכבר הכרנו, לכאורה, והוא המטען החשמלי.

בתמונה שלפנינו רואים את אחת ההדגמות בחשמל, שנערכו לפני צופים.



בהדגמה כזו קשרו נער לתקרה וחיברו אותו ל"מכונת חשמל". "מכונה" הייתה כדור זכוכית, שסובבו אותו במהירות, ותוך כדי סיבוב הוא השתפשף בבד משי.

המטען החשמלי, שנאגר בכדור, עבר דרך גוף הנער לנערה, שאחזה בידו. הנערה קירבה את ידה השנייה לפיסות נייר, שהיו מונחות על השולחן; ולתדהמת הצופים – פיסות הנייר החלו להתרומם באוויר. לסיום הוזמן אחד הצופים לנשק את יד הנערה, וקיבל זעזוע חשמלי חזק למדי, שהשאיר אותו המום לגמרי.



בנימין פרנקלין (1790-1706)

בנימין פרנקלין היה מדינאי ואיש מדע אמריקאי שחי במאה ה-18. הוא חי 84 שנים, ומה שעשה במהלך חייו יכול היה להספיק לכמה וכמה אנשים.

הוא לא קיבל חינוך מסודר, ובגיל 10 הפסיק לבקר בבית-הספר. ובכל-זאת היה במשך השנים מוציא-לאור וסופר, חוקר וממציא. בין השאר המציא את כליא הברק.

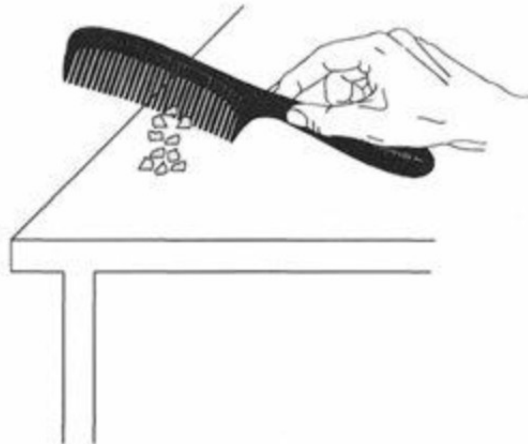
כליא הברק קשור בניסוי מפורסם מאוד. באחד הימים, כאשר בחוץ השתוללה סופת ברקים ורעמים, העיף פרנקלין לשמיים עפיפון בעל חוט מתכת ארוך. הוא קשר מפתח בקצה החוט, והחזיק את המפתח בידו.

כשהעפיפון היה למעלה, עבר ברק דרך העפיפון, אל המפתח, ומשם לגופו של פרנקלין. פרנקלין קיבל זעזוע חזק ורק בנס נשאר חי. על-סמך הניסוי הוא הסיק, שהברק הוא תופעה חשמלית.

בתמונה רואים את פרנקלין ובנו בעת הניסוי.

1.2 המטען החשמלי

הזכרנו שהענבר מושך אליו פיסות בד קטנות. תופעה כזאת אפשר לראות גם במקרים אחרים. אם נעביר מסרק בשֵׂעָר כמה פעמים, ואחר כך נקרב את המסרק לפיסות נייר קטנות, נראה שפיסות הנייר נמשכות אל המסרק (איור 1-1). אם נקרב את המסרק המשופשף – לזרם מים דק, זרם המים יימשך אל המסרק (איור 1-2).



איור 1-1 מעבירים את המסרק בשֵׂערות, ומקרבים אותו לפיסות נייר. פיסות הנייר נמשכות למסרק



איור 1-2 מעבירים את המסרק בשערות, ומקרבים אותו לזרם מים דק. זרם המים מתקרב למסרק

אנו רואים ששפשוף יכול לתת לגופים מסוימים אפשרות למשוך גופים אחרים. כתוצאה מהשפשוף, למסרק ולענבר יש סוג מסוים של כוח משיכה.

יש דוגמאות רבות למשיכה בין גופים כתוצאה משפשוף. נביא כאן שתיים מהן :

- ניירות העוברים במכונת דפוס, במדפסת ובמכונת צילום, נדבקים לפעמים זה לזה כתוצאה משפשוף.
- בגדים במכונת ייבוש – משתפשפים זה בזה, ונדבקים לפעמים זה לזה (איור 1-3).



איור 1-3 בגדים במכונת ייבוש נדבקו זה לזה

מה קורה כאשר גופים משתפשפים זה בזה? אנו יודעים שהגוף המשופשף יכול למשוך אליו גופים אחרים. אבל ממה נובע כוח המשיכה?

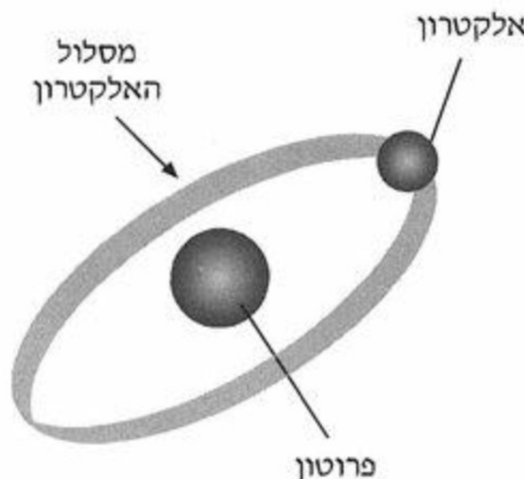
התשובה היא, שכתוצאה מהשפשוף, הגופים המשופשפים נטענו במשהו, ול"משהו" הזה אנו קוראים **מטען חשמלי**. הפעולה, שכתוצאה ממנה נטען גוף, נקראת **טעינה**. כדי להבין טוב יותר מה קורה במהלך השפשוף, יש לדעת כמה עובדות הקשורות במבנה החומר. נביא כאן בקצרה עובדות אלו.

1.3 מבנה החומר

כידוע מלימודים קודמים, החומר מורכב מאטומים. האטום הוא החלק הקטן ביותר של יסוד, השומר עדיין על תכונות היסוד. האטום בנוי מגרעין, ומאלקטרונים הנעים סביב הגרעין. מסת הגרעין גדולה פי אלפים ממסת האלקטרונים, ולכן מרבית המסה של האטום מרוכזת בגרעין; ובכל-זאת - הגרעין תופס רק חלק קטן מאוד מנפח האטום.

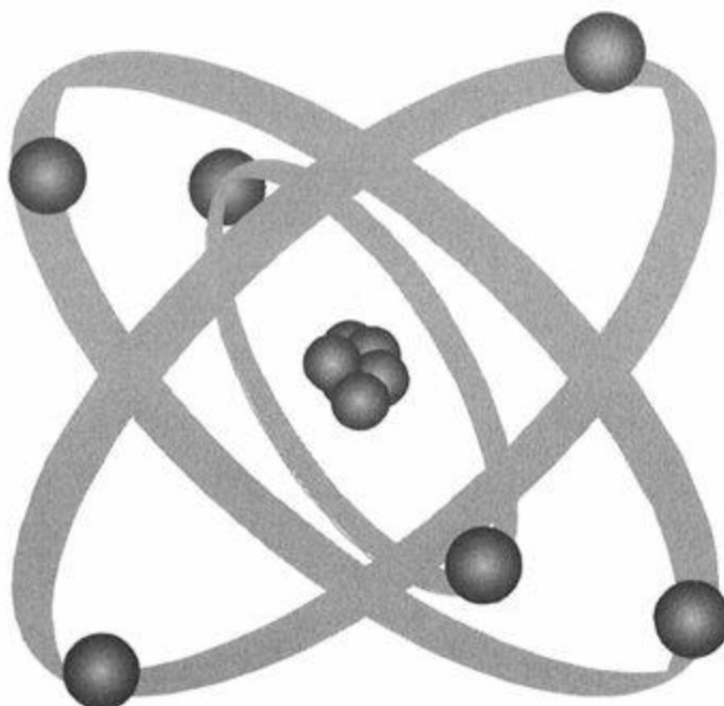
האלקטרונים נעים סביב הגרעין במסלולים שונים, ומסלולים אלה קובעים את ממדי האטום. לפי תיאור זה, מבנה האטום דומה למבנה מערכת השמש שלנו: במערכת השמש – כוכבי הלכת מקיפים את השמש במסלולים שונים; באטום – האלקטרונים מקיפים את הגרעין במסלולים שונים.

הגרעין עצמו בנוי מחלקיקים יסודיים יותר: פרוטונים ונייטרונים. בתיאור שהבאנו, הפרוטונים, הנייטרונים והאלקטרונים הם חלקיקי היסוד של החומר בטבע. אנו נעסוק בעיקר באלקטרונים, ומעט גם בפרוטונים. בנייטרונים לא נעסוק כמעט בכלל, והסיבה לכך תתברר בהמשך. באיור 1-4 מתואר אטום, הכולל פרוטון אחד ואלקטרון אחד.



איור 1-4 באטום זה יש אלקטרון אחד, ובגרעין שלו יש פרוטון אחד. הציור לא נעשה בקנה-מידה נכון: המרחק בין האלקטרון לפרוטון גדול פי עשרות אלפים מרדיוס הפרוטון

באיור 1-5 מתואר אטום, הכולל גרעין ושישה אלקטרונים. כאמור, הגרעין בנוי מפרוטונים ונייטרונים. בהמשך הסעיף נדון בקשר שבין מספר הפרוטונים ומספר האלקטרונים באטום.



איור 1-5 באטום זה יש גרעין ושישה אלקטרונים

מטען הפרוטון ומטען האלקטרון

מהו ההבדל בין האלקטרון לפרוטון?

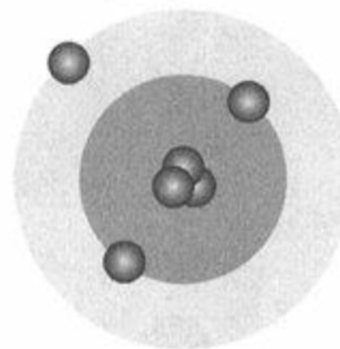
הם שונים במסה שלהם: מסת הפרוטון גדולה פי 2000 כמעט ממסת האלקטרון. הם שונים גם במטען החשמלי שלהם: לאלקטרון ולפרוטון יש מטענים מסוגים שונים. למטען האלקטרון החליטו לקרוא **מטען שלילי**, ולמטען הפרוטון החליטו לקרוא **מטען חיובי**. הנה סימוני המטענים:

החלקיק	סוג המטען	סימון המטען
פרוטון	חיובי	+
אלקטרון	שלילי	-

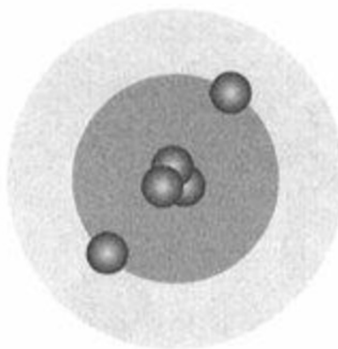
גודל המטען של האלקטרון שווה לגודל המטען של הפרוטון. מסמנים גודל זה באות e. מטען הפרוטון הוא $+e$ (ובקיצור: e), ומטען האלקטרון הוא $-e$.

ומה לגבי הנייטרונים? הנייטרונים אינם טעונים, ואנו אומרים כי הם **אדישים** (נייטרליים) מבחינה חשמלית. מכיוון שאנו עוסקים במטענים, לא נעסוק כמעט בנייטרונים.

לא רק הנייטרונים אדישים מבחינה חשמלית. באטום – מספר האלקטרונים שווה למספר הפרוטונים, ולכן אטום שלא הוצאו ממנו אלקטרונים, ולא נוספו לו אלקטרונים – גם הוא אדיש מבחינה חשמלית. אבל אטום, שנוספו לו אלקטרונים או שהוצאו ממנו אלקטרונים, חדל להיות אדיש מבחינה חשמלית, והוא טעון במטען חשמלי. אטום כזה נקרא **יון**. באיור 1-6 מתואר יון חיובי. ביון חיובי יש עודף פרוטונים על אלקטרונים. באיור 1-7 מתואר יון שלילי. ביון שלילי יש עודף אלקטרונים על פרוטונים.

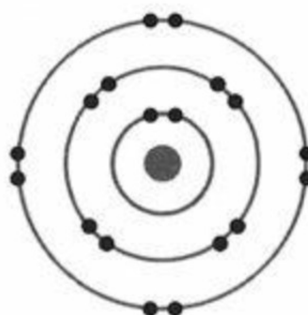


א – באטום זה יש שלושה אלקטרונים ושלושה פרוטונים. אטום זה אדיש מבחינה חשמלית



ב– אלקטרון אחד הוצא מהאטום, וכעת יש בו שני אלקטרונים ושלושה פרוטונים, וזהו יון חיובי

איור 1-6

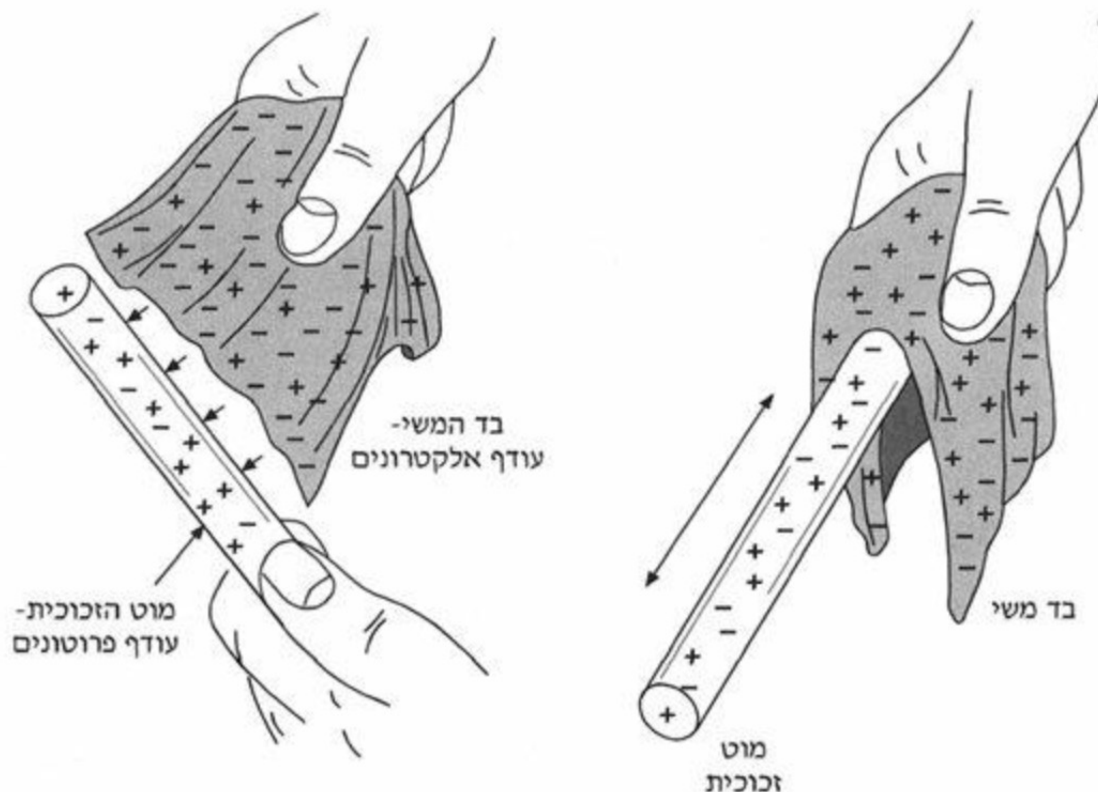


איור 1-7 באטום הכלור יש שבעה-עשר פרוטונים ושבעה-עשר אלקטרונים. כאשר נוסף לו אלקטרון אחד, יש בו עודף אלקטרונים על פרוטונים, וזהו יון שלילי.

טעינה על-ידי שפשוף

כאמור, הגופים בטבע בנויים מאטומים, והאטומים אדישים מבחינה חשמלית. גם גוף, שלא הוצאו ממנו אלקטרונים ולא נוספו לו אלקטרונים, הוא אדיש מבחינה חשמלית. אך כשאנו משפשפים שני גופים זה בזה (איור 1-8, למשל), אלקטרונים יכולים לעבור מגוף לגוף: לאחד הגופים נוספים אלקטרונים, ולגוף האחר חסרים אלקטרונים. מספר הפרוטונים בכל גוף אינו משתנה, ולכן מתקבל המצב הבא:

לגוף אחד יש **יותר** אלקטרונים מאשר פרוטונים;
לגוף השני יש **פחות** אלקטרונים מאשר פרוטונים.



איור 1-8 כאשר משפשפים מוט זכוכית בבד משי, אלקטרונים עוברים מהזכוכית למשי. לאחר השפשוף, מוט הזכוכית טעון במטען חיובי, ובד המשי טעון במטען שלילי

במקרה כזה אומרים כי

הגוף הראשון טעון מטען **שלילי** (לגוף זה יש עודף אלקטרונים);
הגוף השני טעון מטען **חיובי** (לגוף זה חסרים אלקטרונים).
ובקיצור: הגוף הראשון טעון **שלילית**, והגוף השני טעון **חיובית**.

נסכם את תופעת הטעינה על-ידי שפשוף:

כאשר גופים משתפשפים זה בזה, אלקטרונים עוברים מגוף אחד לגוף האחר, ושני הגופים נטענים במטען חשמלי.



דוגמה 1-1

א. באטום הכסף יש 47 פרוטונים. כמה אלקטרונים יש באטום זה?

ב. אטום כסף מסר אלקטרון אחד לאטום כלור. איזה אטום נטען במטען שלילי כתוצאה מכך?

פתרון

א. מספר האלקטרונים באטום שווה למספר הפרוטונים. באטום הכסף יש 47 פרוטונים, וזהו גם מספר האלקטרונים באטום זה.

ב. לאטום הכלור יש עודף של אלקטרון אחד, ולכן הוא טעון במטען שלילי.





שאלות חזרה



שאלה 1-1

שִׁפשפו שני גופים זה בזה. כתוצאה מכך יש לאחד הגופים עודף אלקטרונים. האם גוף זה הוא עכשיו אדיש מבחינה חשמלית, או טעון במטען חשמלי?

שאלה 1-2

משפשפים שני גופים, וכתוצאה מכך, לאחד מהם יש עודף פרוטונים. האם גוף זה טעון מטען חיובי או מטען שלילי?

שאלה 1-3

בגרעין של אטום הניאון יש 10 פרוטונים. כמה אלקטרונים יש באטום הניאון?

שאלה 1-4

אילו מהחלקיקים הבאים הם אדישים מבחינה חשמלית: אטום, פרוטון, נייטרון, אלקטרון?

שאלה 1-5

אטום סידן מסר שני אלקטרונים לאטום חמצן. איזה אטום נטען במטען חיובי, כתוצאה מכך?

שאלה 1-6

סמן את המשפטים הנכונים. נמק את תשובותיך.

א. לגוף אדיש מבחינה חשמלית אין אלקטרונים.

ב. אם לגוף יש נייטרונים, הוא אדיש מבחינה חשמלית.

ג. לגוף, הטעון שלילית, יש עודף אלקטרונים.

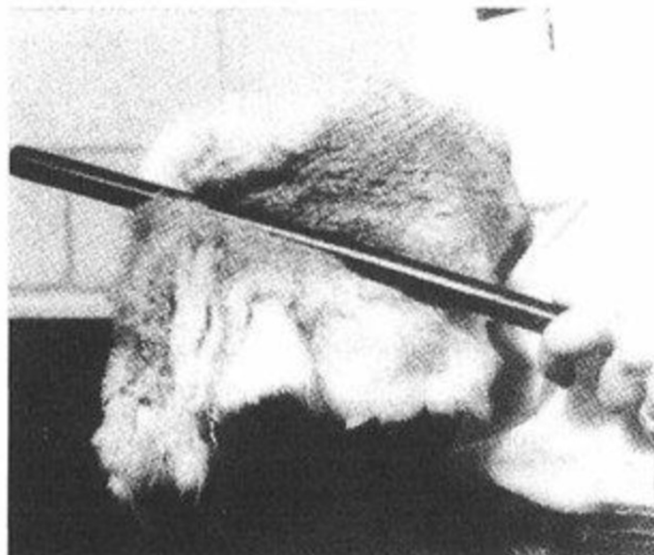
ד. אם בגוף יש אלקטרונים, הגוף טעון.

ה. אם בגוף חסרים אלקטרונים, הגוף טעון חיובית, בלי קשר למספר הנייטרונים בגוף.

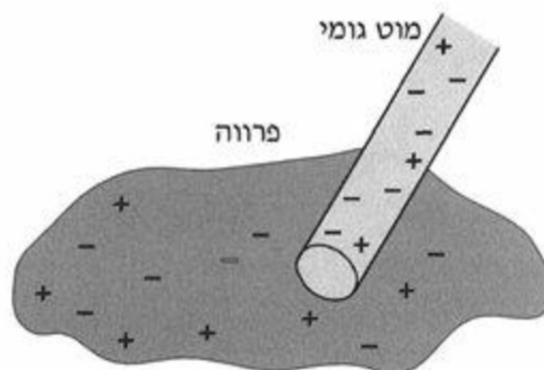
1.4 מטענים במנוחה והכוחות הפועלים עליהם

ראינו שכאשר משפשפים גוף, הוא נטען במטען חיובי או במטען שלילי. נניח כי שני גופים נטענים. איך נוכל לדעת אם שני הגופים טעונים במטענים מאותו סוג, או במטענים מסוגים שונים? אפשר לענות על שאלה זו בעזרת ניסוי פשוט. נדגים זאת:

לוקחים שני מוטות זכוכית התלויים זה ליד זה, וטוענים אותם על-ידי שפשופם במטלית משי. רואים שהמוטות מתרחקים זה מזה. כלומר, מוטות הזכוכית דוחים זה את זה. עכשיו טוענים שני מוטות גומי על-ידי שפשופם בפרווה (איור 1-9). מגלים כי גם מוטות הגומי דוחים זה את זה.



א – אפשר לטעון מוט גומי על-ידי שפשופו בפרווה



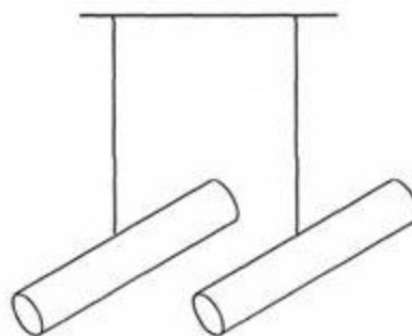
ב – לאחר השפשוף, במוט הגומי יש עודף אלקטרונים, ובפרווה יש עודף פרוטונים

איור 1-9

שני מוטות הזכוכית נטענו בצורה דומה, ולכן שניהם טעונים במטענים מאותו סוג, כלומר: לשני המוטות יש מטענים בעלי סימנים זהים. גם שני מוטות הגומי נטענו בצורה דומה, ולכן גם להם יש מטענים בעלי סימנים זהים. מוטות הזכוכית הטעונים – דוחים זה את זה, ומוטות הגומי הטעונים – דוחים זה את זה; ובאופן כללי:

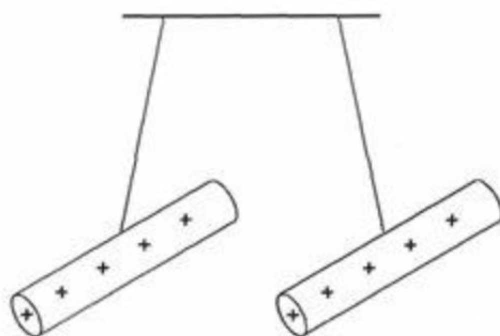
מטענים בעלי סימנים זהים – דוחים זה את זה.

כלומר, שני גופים, הטעונים במטענים חיוביים, דוחים זה את זה; ושני גופים, הטעונים במטענים שליליים, דוחים זה את זה. באיור 1-10ב נתונים שני מוטות זכוכית, שכל אחד מהם טעון במטען חיובי; ובאיור 1-11ב נתונים שני מוטות גומי, שכל אחד מהם טעון במטען שלילי.



שני מוטות זכוכית
לא טעונים

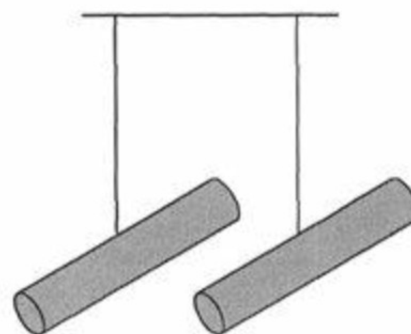
א



שני מוטות זכוכית
טעונים במטען חיובי

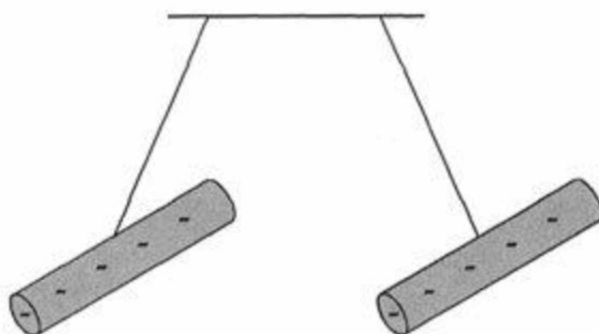
ב

איור 1-10 שני מוטות זכוכית, הטעונים במטענים בעלי סימנים זהים, דוחים זה את זה



שני מוטות גומי
לא טעונים

א



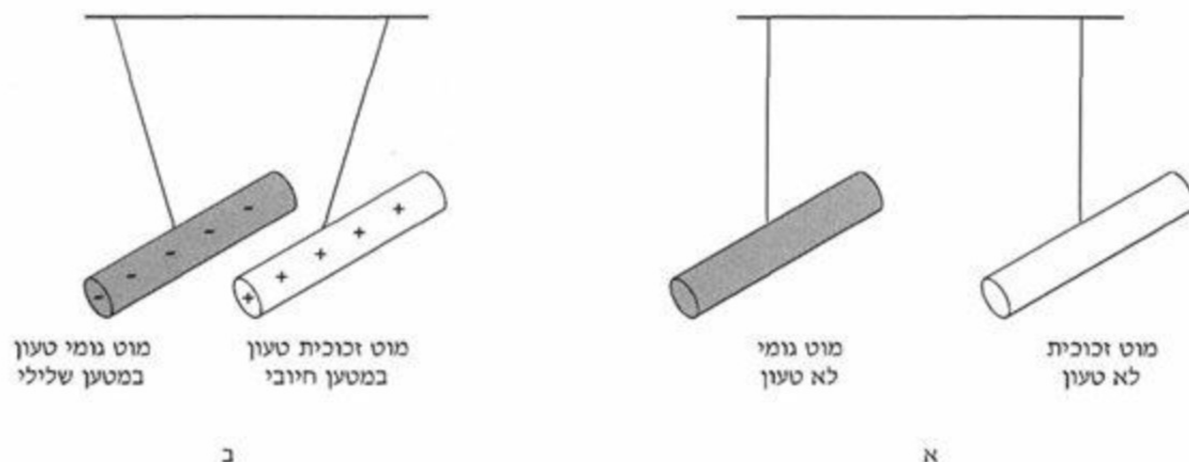
שני מוטות גומי
טעונים במטען שלילי

ב

איור 1-11 שני מוטות גומי, הטעונים במטענים בעלי סימנים זהים, דוחים זה את זה

עכשיו נקרב מוט זכוכית טעון למוט גומי טעון. נגלה כי שני המוטות מתקרבים זה לזה, כלומר, המוטות **מושכים זה את זה.** נוכל להסביר את המשיכה אם נניח כי לשני המוטות יש מטענים בעלי סימנים שונים. מכאן ניתן להסיק כי

מטענים בעלי סימנים שונים מושכים זה את זה (איור 1-12)



איור 1-12 שני מוטות, הטעונים במטענים בעלי סימנים שונים, מושכים זה את זה

הנה התשובה לשאלה ששאלנו קודם: לפי המשיכה או הדחייה בין גופים טעונים, נוכל לדעת אם סימני המטענים שלהם זהים או שונים.

טעינה על-ידי מגע

נטען עכשיו כדור גומי, וניגע בו בכדור מתכת (איור 1-13). נרחיק את הכדורים זה מזה, ושוב נקרב אותם זה לזה. נגלה כי כדור הגומי וכדור המתכת דוחים זה את זה. המסקנה היא שכדור המתכת נטען במטען, שסימנו זהה לסימן המטען של כדור הגומי. כשהכדורים נגעו זה בזה, עבר מטען מכדור הגומי לכדור המתכת. אומרים כי כדור המתכת **נטען על-ידי מגע**.



איור 1-13 טעינה על-ידי מגע

שימושים במשיכה ובדחייה של מטענים

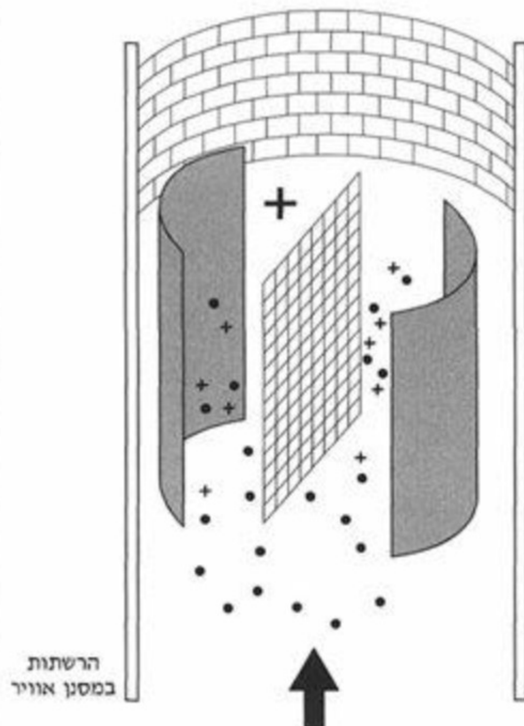
לתופעת המשיכה בין מטענים שׁוֹנֵי-סימן והדחייה בין מטענים שָׁוֵוי-סימן, יש שימושים מסחריים שונים. נראה דוגמאות אחדות לשימושים כאלה.

מכונה לצילום מסמכים



בתוך מכונת הצילום יש הֶתְקֵן, היוצר צורות שונות של מטענים חיוביים על דף נייר, כשהדף נמצא בתוך המכונה. הצורות האלה הן העתק של הצורות שעל הדף המצולם. אבקת פחם, הטעונה מטען שלילי, נמשכת לאזורים הטעונים מטען חיובי, וכך מתקבלות הצורות על הדף החלק (כדי שהצורות יישארו על הדף, מחממים את הדף בתוך המכונה).

מסנן אוויר חשמלי



דוגמה אחרת היא מסנן אוויר חשמלי. המסנן פועל כך: כאשר רוצים לסנן את האוויר, מעבירים אותו דרך כמה רשתות. רשתות אלו גורמות לכך, שחלקיקי האבק והלכלוך נטענים במטען חיובי. אחר-כך מעבירים את האוויר דרך רשת, הטעונה במטען שלילי. רשת זו מושכת אליה את חלקיקי האבק והלכלוך, הטעונים במטען חיובי. האוויר יוצא דרך הרשתות האלה כשהוא נקי.



מתיז צבע
חשמלי

מתיזי צבע חשמליים הם דוגמה למכשירים המנצלים את הדחייה שבין מטענים שְׁוֵוי-סימן. באמצעות לחץ אוויר, הצבע מותז לפיית המכשיר, ושם הוא מופרד לטיפות זעירות. תוך כדי יציאה מהפייה, כל טיפה נטענת במטען חיובי. כתוצאה מכך, הטיפות דוחות זו את זו, ועל הקיר מתקבלת שכבת צבע דקה ואחידה.

1.5 הגורמים המשפיעים על גודל כוחות המשיכה והדחייה בין מטענים

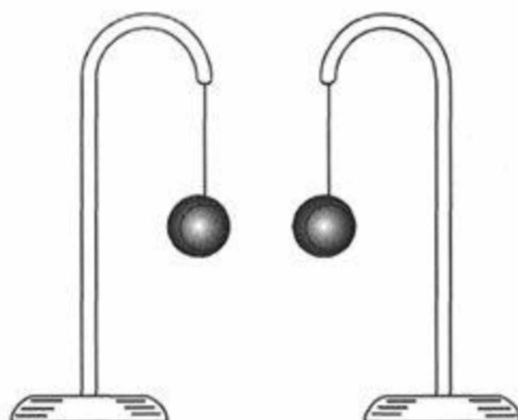
ראינו דוגמאות רבות למשיכה ולדחייה בין גופים טעונים. בשלב זה אנו יודעים שפועל כוח בין מטענים, אבל איננו יודעים מהם הגורמים המשפיעים על גודל הכוח. כדי ללמוד מה קובע את גודל הכוח הפועל בין מטענים, אפשר להיעזר בכמה ניסויים פשוטים, שנתאר אותם כאן.

ניקח שני כדורי מתכת, ונתלה כל אחד מהם על מתלה, כמו באיור 1-14. נטען כל כדור במטען חשמלי. כתוצאה מכך הכדורים יתרחקו זה מזה, וכל כדור יזוז ממצבו ההתחלתי, כפי שרואים באיור 1-15.

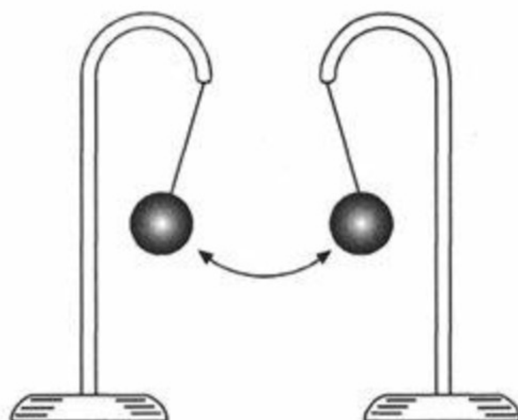
כעת נחזור על הניסוי בצורה שונה במקצת. נטען שוב את שני הכדורים התלויים, בדיוק כמו בפעם הקודמת, אלא שהפעם ניקח שני כדורי מתכת נוספים, לא טעונים, כך שכל כדור לא טעון ייגע בכדור טעון. כל כדור טעון יעביר חלק ממטענו לכדור הלא טעון שנגע בו, ולכן עכשיו יהיה המטען של כל אחד מהכדורים – קטן יותר מאשר בפעם הקודמת.

נבדוק מה קורה לכדורים הפעם. גם הפעם הם מתרחקים זה מזה, אבל למרחק קטן יותר מאשר בפעם הקודמת, כפי שרואים באיור 1-16. כלומר: עכשיו, הכוח הפועל בין הכדורים הטעונים – קטן יותר. מכאן אנו למדים כי

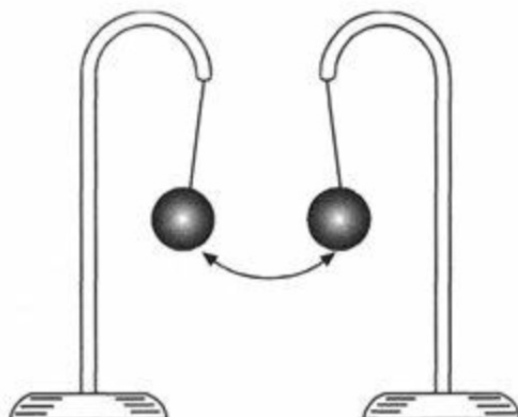
אם המטענים קטנים יותר,
הכוח הפועל ביניהם קטן יותר, ולהיפך.



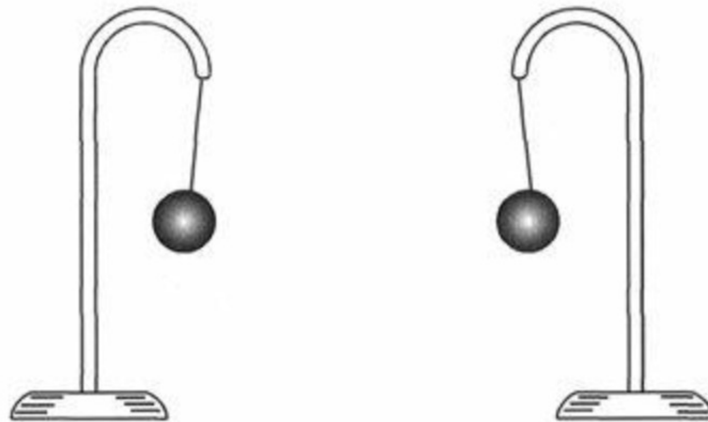
איור 1-14 שני כדורי מתכת לא טעונים



איור 1-15 שני כדורי המתכת – לאחר שכל אחד מהם נטען במטען שלילי



איור 1-16 שני כדורי המתכת נטענו במטען קטן יותר מאשר באיור 1-15. הפעם הם מתרחקים זה מזה מרחק קטן יותר מזה המתואר באיור 1-15



איור 1-17 שני כדורי המתכת נטענו במטען זהה לזה שבאיור 1-16, והוצבו במרחק גדול יותר מאשר באיור 1-16. הכדורים מתרחקים זה מזה – פחות מאשר באיור 1-16

נחזור על הניסוי בפעם השלישית. נטען את הכדורים כמו בניסוי הראשון, אבל עכשיו נשנה בכל פעם את המרחק בין הכדורים. נגלה שאם המרחק בין הכדורים גדול יותר, הכדורים מתרחקים פחות זה מזה, כפי שאפשר לראות באיור 1-17. מכאן אנו למדים כי

אם המרחק בין המטענים גדול יותר, הכוח הפועל ביניהם קטן יותר, ולהיפך.

שרל אוגוסטין דה קולון

(1806-1736)



קולון היה מהנדס ופיזיקאי צרפתי. הוא גילה את הקשר בין גודל הכוח, הפועל בין מטענים, לבין גודל המטענים והמרחק ביניהם. לכן הקשר הזה נקרא על שמו: **חוק קולון.** כדי למדוד את הכוח הפועל בין מטענים, המציא קולון מכשירי מדידה רגישים. ראוי לציין כי בתולדות המדע ידועים מקרים רבים שבהם המצאת מכשירי מדידה רגישים יותר, הובילה לגילוי חוקים חדשים.

קולון גילה גם את חוק הכוח הפועל בין קטבים של מגנט (חוק זה דומה בצורתו לחוק קולון), וכן עסק במחקרים נוספים. אך הישגו החשוב ביותר היה ניסוח חוק קולון. יחידת המטען החשמלי נקראת על שמו של קולון.

בניסויים דומים, אך מדויקים יותר, התקבלו התוצאות האלה:

א. *גודל הכוח הפועל בין שני מטענים,*
נמצא ביחס ישר למכפלת המטענים.

למשל, אם מגדילים את מכפלת המטענים פי 2, גם הכוח גדל פי 2.

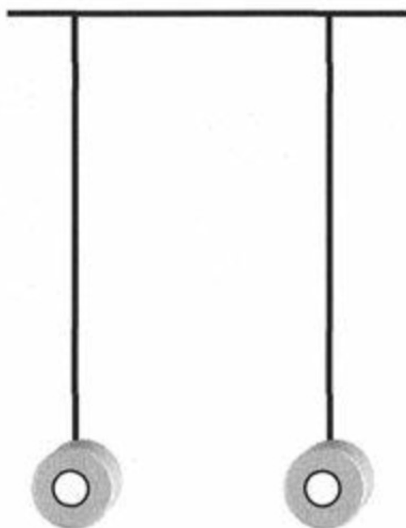
ב. *גודל הכוח נמצא ביחס הפוך*
לריבוע המרחק בין המטענים.

למשל, אם מגדילים פי 3 את המרחק בין המטענים, הכוח בין המטענים קטן פי 9 (כלומר, פי 3 בריבוע).

והתוצאה הכללית:

גודל הכוח בין מטענים נמצא ביחס ישר למכפלת המטענים,
וביחס הפוך לריבוע המרחק בין המטענים.

כוחות המשיכה והדחייה החשמליים יכולים להיות גדולים מאוד. כדי להיווכח בכך, נתאר לעצמנו שני תקליטורים, הנמצאים באותו חדר. נניח שהצלחנו להעביר אחוז אחד מהאלקטרונים של תקליטור אחד – לתקליטור השני. כוח המשיכה, שהיה נוצר בין שני התקליטורים, היה גדול אלפי מונים ממשקל כל הבניינים בארץ.



אבל האטומים – וגם הגופים הבנויים מהם (תקליטורים, למשל) – אדישים במצב רגיל (מבחינה חשמלית), ולמעשה לא פועלים כוחות חשמליים בין התקליטורים ובין גופים אחרים, כל עוד הגופים אינם טעונים.

1.6 יחידות מטען

כדי שנוכל לדון בצורה מדויקת יותר במטענים ובכוחות הפועלים ביניהם, עלינו לציין את גודל המטען בצורה מדויקת. נניח שנתון כדור הטעון במטען מסוים. נסמן את מטען הכדור באות Q. כדי שנוכל לדעת במדויק כמה מטען היה על הכדור, עלינו לבטא את Q על-ידי מספר ולצידו יחידות. (גם כשאנו מודדים מרחק, למשל, עלינו לבטא אותו על-ידי מספר, ולציין אם מדדנו את המרחק בסנטימטרים, במטרים או בקילומטרים.)

אם-כן, עלינו לקבוע מהי יחידת המטען, שבעזרתה נוכל למדוד מטען Q נתון. ראינו שמטען של גוף נקבע על-ידי ההפרש בין מספר האלקטרונים למספר הפרוטונים בגוף (אם יש עודף אלקטרונים, הגוף טעון מטען שלילי; ואם חסרים אלקטרונים, הגוף טעון מטען חיובי). לכן נוכל לקבוע את מטען האלקטרון כיחידת המטען. אם, למשל, יש עודף של 5 אלקטרונים, נאמר שהמטען הוא $-5e$; ואם חסרים 5 אלקטרונים, נאמר שהמטען הוא $+5e$.

אבל למדידות מעשיות, מטען האלקטרון קטן מדי. אילו בחרנו את הגודל של מטען האלקטרון, e, כיחידת מטען, היינו צריכים לעסוק במספרים גדולים מאוד, והדבר היה מקשה על החישובים. לכן קבעו יחידת מטען גדולה יותר. יחידת המטען נקבעה כגודל סכום המטענים של 6.24×10^{18} אלקטרונים. ליחידת מטען זו קוראים **קולון**, ומסמנים אותה באות C. מכאן נקבל כי

$$1\ \mathrm{C} = 6.24 \times 10^{18} e = 6{,}240{,}000{,}000{,}000{,}000{,}000\ e$$

על הסיבה לבחירת מספר זה – נלמד בהמשך.

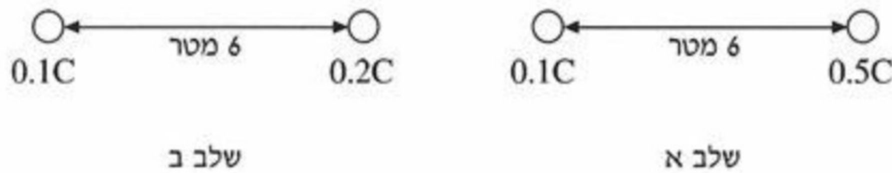
בדרך-כלל, לא נספור את ההפרש בין מספר האלקטרונים לבין מספר הפרוטונים בגוף טעון, אלא נשתמש ביחידת המטען קולון (או, למשל, באלפית הקולון), כדי לבצע חישובים.



דוגמה 1-2

שני כדורים נטענו במטענים שְׁוֵוי-סימן. כדור אחד נטען במטען של 0.5 C, והכדור השני נטען במטען של 0.1 C. המרחק בין המטענים היה 6 מטר. כוח הדחייה בין המטענים היה 12,500,000 N (כאשר N מציין את יחידת הכוח ניוטון; המשקל, או הכוח, של קילוגרם אחד על כדור-הארץ הוא 9.8 N בערך).

לאחר מכן טענו את הכדור הראשון במטען של 0.2 C, ולא שינו את מטען הכדור השני. מהו עכשיו כוח הדחייה בין המטענים?



איור 1-18

פתרון

בשלב הראשון

מטען הכדור הראשון – 0.5 C, ומטען הכדור השני – 0.1 C . מכפלת המטענים היא

$$0.5 \times 0.1 = 0.05$$

בשלב הראשון – כוח הדחייה בין המטענים הוא 12,500,000 N.

בשלב השני

מטען הכדור הראשון – 0.2 C, ומטען הכדור השני – 0.1 C (ללא שינוי). מכפלת המטענים היא $0.2 \times 0.1 = 0.02$. היחס בין מכפלת המטענים בשלב הראשון למכפלת המטענים בשלב השני, הוא

$$\frac{0.05}{0.02} = 2.5$$

כלומר, בשלב השני מכפלת המטענים קטנה פי 2.5 מאשר בשלב הראשון. ראינו שגודל הכוח בין מטענים – נמצא ביחס ישר למכפלת המטענים. לכן גודל הכוח בשלב השני קטן פי 2.5 מאשר בשלב הראשון:

$$12{,}500{,}000 : 2.5 = 5{,}000{,}000 \text{ N}$$

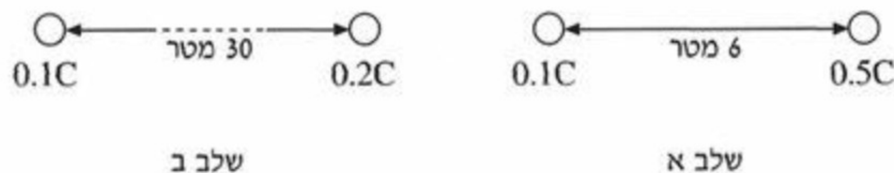
בשלב השני – כוח הדחייה בין המטענים הוא 5,000,000 N.



 דוגמה 1-3

באיור 1-19 מתוארים שני גופים טעונים. בשלב הראשון, המרחק בין הגופים הוא 6 מטר, וכוח הדחייה בין המטענים הוא 12,500,000 N. בשלב השני הרחיקו את הגופים למרחק של 30 מטר זה מזה.

מהו עכשיו גודל כוח הדחייה בין המטענים?



איור 1-19

פתרון

בשלב הראשון

המרחק בין המטענים – 6 מטר, והמרחק בריבוע – 36. כוח הדחייה בין המטענים – 12,500,000 N.

בשלב השני

המרחק בין המטענים – 30 מטר, והמרחק בריבוע – 900. ראינו שכוח הדחייה בין מטענים – נמצא ביחס הפוך למרחק בריבוע. בשלב השני, המרחק בריבוע גדול פי

$$\frac{900}{36} = 25$$

מאשר בשלב הראשון, ולכן בשלב השני הכוח יהיה קטן פי 25, כלומר:

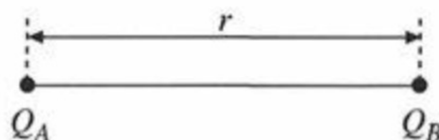
$$\frac{12,500,000}{25} = 500,000\,N$$

בשלב השני, גודל הכוח הוא 500,000 N.



ראינו כי גודל הכוח בין מטענים – נמצא ביחס ישר למכפלת המטענים, וביחס הפוך לריבוע המרחק בין המטענים. עתה, כשאנו מצוידים ביחידת מטען מוגדרת היטב, נוכל לנסח בצורה מתֵמטית את חוק הכוח הפועל בין מטענים. חוק זה, שהתגלה – כאמור – על־ידי קולון, נקרא **חוק קולון**. חוק זה קובע כי

אם נתונים שני גופים טעונים,
ונתון כי מטען גוף אחד הוא Q_A
ומטען הגוף השני הוא Q_B
והמרחק בין שני הגופים הוא r מרוחק מרחק r (כפי שמתואר באיור 1-20)



איור 1-20 שני מטענים, Q_A ו-Q_B, שהמרחק ביניהם הוא r

אז
גודל הכוח F שמפעיל הגוף, שמטענו Q_A, על גוף שמטענו Q_B
נתון על-ידי המשוואה

$$F = k\frac{Q_A Q_B}{r^2} \qquad (1\text{-}1)$$

אם המטענים שָׁוֵוי-סימן, הכוח F הוא כוח דחייה; ואם המטענים שׁוֹנֵי-סימן, הכוח F הוא כוח משיכה.

אם המטענים במשוואה זו נמדדים ביחידות קולון (C),
המרחק נמדד במטרים (m),
והכוח נמדד בניוטונים (N),
אז ערך הקבוע k הוא $k = 9\times10^9\ \frac{\mathrm{N\times m^2}}{\mathrm{C^2}}$. בהמשך הספר נדון בקבוע זה.

מערכת היחידות, שבה מבוטאים הגדלים במשוואה $F = k\frac{Q_A Q_B}{r^2}$, נקראת **מערכת היחידות SI** (SI – ראשי־התיבות של שתי המילים System International – מערכת

בינלאומית). במערכת זו נמדד האורך במטרים (m), המסה נמדדת בק״ג (kg), והזמן נמדד בשניות (s). יחידת המטען במערכת זו – היא הקולון (C).



דוגמה 1-1

מהו הכוח החשמלי הפועל בין שני מטענים, שכל אחד מהם הוא בן קולון אחד, והמרחק ביניהם הוא מטר אחד?

פתרון

הנה הנתונים, כשהם מבוטאים בשיטת היחידות SI.

$$Q_A = Q_B = 1\ \text{C}$$

$$r = 1\ \text{m}$$

$$k = 9\times10^9\ \frac{\text{N}\times\text{m}^2}{\text{C}^2}$$

נציב במשוואה $F = k\frac{Q_A Q_B}{r^2}$ את הנתונים, ונקבל כי הכוח החשמלי F, הפועל בין המטענים, נתון על־ידי

$$F = k\frac{Q_A Q_B}{r^2} = 9\times10^9\ \frac{1\times1}{1^2} = 9\times10^9\ \text{N} = 9{,}000{,}000{,}000\ \ \text{N}$$

כדי לקבל מושג-מה על גודלו של כוח זה, נציין כי כדי לבלום מכונית, שהמסה שלה 650 kg, ואשר נעה על כביש מישורי במהירות של 100 km/h – כשמרחק הבלימה של המכונית הוא 50 m – דרוש כוח קבוע של 5,000 N בקירוב. כוח זה קטן פי 1,800,000 מהכוח החשמלי שבין שני המטענים שלעיל.

לעומת זאת, אם כל אחד מהמטענים יהיה 10^{-6}C, והמרחק ביניהם יהיה מטר אחד, נקבל כי הכוח – הפועל בין המטענים – הוא רק 0.009 N .



שאלות חזרה

שאלה 1-7

בין שני גופים קיימת דחייה חשמלית. מה נוכל לדעת על סימן המטען של כל אחד מגופים אלה?

שאלה 1-8

נתונים שני גופים נייטרליים. ברגע מסוים הועברו אלקטרונים מגוף אחד לגוף האחר. האם הגופים ימשכו זה את זה, או ידחו זה את זה?

שאלה 1-9

נתונים זוגות חלקיקים. סמן לגבי כל זוג, אם יש משיכה או דחייה חשמלית בין שני החלקיקים, או ששום כוח חשמלי אינו פועל ביניהם.

א. פרוטון ואלקטרון
ב. פרוטון ונייטרון
ג. אלקטרון ונייטרון
ד. אלקטרון ואלקטרון
ה. פרוטון ופרוטון
ו. נייטרון ונייטרון

שאלה 1-10

גוף אחד טעון במטען חיובי של 0.2 C, וגוף שני טעון במטען שלילי של –0.3 C. האם הגופים ימשכו זה את זה, או ידחו זה את זה?

שאלה 1-11

א. מגדילים פי 4 את המרחק בין שני מטענים חיוביים. פי כמה יגדל – או יקטן – הכוח החשמלי בין המטענים?
ב. חזור על הסעיף הקודם, אלא ששני המטענים שליליים.

שאלה 1-12

נתונים שני גופים טעונים: מטען הגוף הראשון 0.3 C, ומטען הגוף השני – 0.4 C. הכוח החשמלי בין הגופים הוא 30,000,000 N.

א. מה יהיה הכוח בין הגופים, אם מטען הגוף הראשון יהיה 0.6 C?

ב. הפעם מטען הגוף השני 0.8 C (מטען הגוף הראשון – 0.3 C). מהו עכשיו הכוח בין הגופים?

ג. מה יהיה הכוח בין הגופים, אם מטען כל אחד מהגופים יהיה כפול ממטענם בהתחלה?

שאלה 1-13

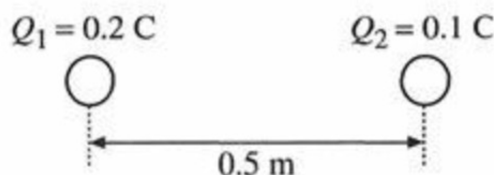
שני מטענים זהים, בני קולון אחד, נדחים זה מזה בכוח של ניוטון אחד. חשב את המרחק בין המטענים.

שאלה 1-14

המרחק בין שני מטענים הוא 5 ס"מ. מה גודלו וסימנו של המטען הראשון, Q_1, אם המטען השני, $Q_2 = 5 \times 10^{-6}$ C, נדחה ממנו בכוח של 7.2 N?

שאלה 1-15

נתונים שני מטענים: $Q_1 = 0.2$ C, $Q_2 = 0.1$ C. המרחק בין המטענים הוא 0.5 m (איור 1-21). מניחים מטען חיובי של 0.1 C על הקטע המחבר את שני המטענים (או על המשכו).



איור 1-21

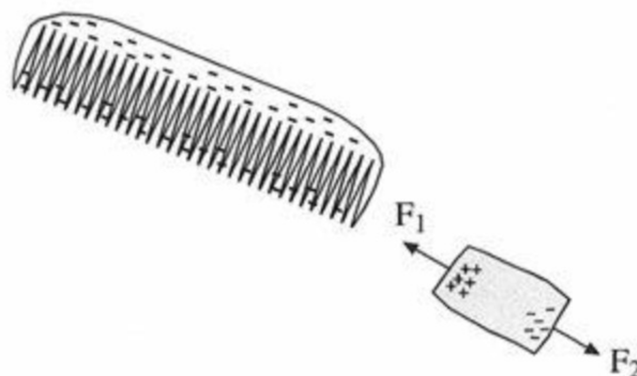
א. סמן את הנקודה, שבה יש לשים את יחידת המטען החיובי, כך שסכום הכוחות, שיפעילו עליה שני המטענים, יהיה שווה לאפס.

ב. חזור על הסעיף הראשון, אלא שהפעם $Q_2 = -0.1$ C.

1.7 הפרדת מטענים על-ידי השראה חשמלית

הסברנו שמטענים שְׁוֵוי-סימן דוחים זה את זה, ומטענים שׁוֹנֵי-סימן מושכים זה את זה. אבל ראינו גם שמסרק טעון מושך אליו פיסות נייר **שלא היו טעונות**. פיסות הנייר נמשכות אל המסרק כאילו היו טעונות במטען, שסימנו הפוך לסימן המטען של המסרק. נסביר עתה כיצד קורה הדבר.

כשאנו מסתרקים, המסרק מתחכך בשערותינו, ונטען במטען שלילי (איור 1-22). כאשר אנו מקרבים את המסרק לפיסת נייר, דוחים האלקטרונים – שבמסרק הטעון – את האלקטרונים שבנייר, לצד המרוחק מהמסרק. בצד, הקרוב למסרק, יש מחסור באלקטרונים, כלומר: יש עודף מטענים חיוביים. מטענים חיוביים אלה נמשכים למטענים השליליים של המסרק.



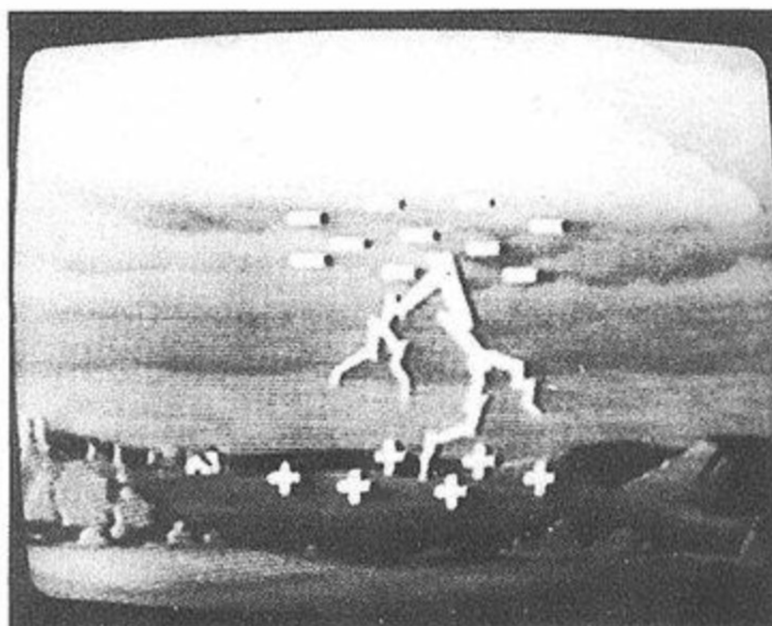
איור 1-22 מקרבים מסרק טעון לפיסת נייר לא טעונה

ומה קורה למטענים השליליים שבפיסת הנייר (איור 1-22)? בצד הרחוק של פיסת הנייר יש עכשיו עודף מטענים שליליים. אבל המטענים השליליים האלה **רחוקים** מהמסרק – יותר מאשר המטענים החיוביים שבפיסת הנייר. ראינו שאם המרחק גדול יותר, הכוח קטן יותר. לכן כוח **הדחייה** F_2, הפועל בין המטענים השליליים שבפיסת הנייר, לבין המטענים השליליים שבמסרק, **קטן** יותר מכוח **המשיכה** F_1 שבין המטענים החיוביים שבפיסת הנייר, לבין המטענים השליליים שבמסרק. התוצאה היא שהנייר נמשך למסרק.

כאשר קירבנו את המסרק לפיסת הנייר, גרמנו להפרדת המטענים השליליים מהחיוביים. אומרים כי תהליך זה של הפרדת מטענים נעשה על-ידי **השראה חשמלית**.

ההסבר לתופעת הברק

עכשיו, לאחר שהכרנו והסברנו כמה תופעות חשמליות, נוכל להבין (במידה מסוימת) את תופעת הברק. ראינו כי מטענים יכולים להצטבר בגופים באמצעות חיכוך, או השראה חשמלית או מגע. הברק נוצר כתוצאה מצירוף של פעולות אלו. בתוך ענן יש טיפות מים וחלקיקי אבק הנעים ברוח. החיכוך בין החלקיקים האלה גורם להצטברות של מטענים שליליים, והמטענים האלה עוברים – באמצעות מגע – לתחתית הענן (איור 1-23).

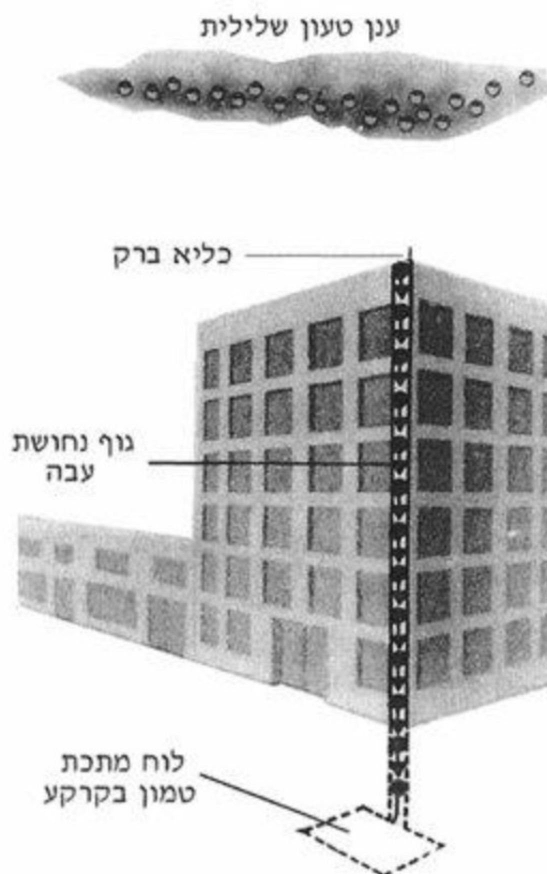


איור 1-23 כמות גדולה של מטענים שליליים מצטברת בתחתית הענן. על- פני הקרקע נותר מטען חיובי, כתוצאה מהשראה חשמלית

כאשר בתחתית הענן מצטברת כמות גדולה של מטענים שליליים, מתרחשת השראה חשמלית: המטענים השליליים שבענן דוחים אלקטרונים הנמצאים בקרקע, וקרוב לפני הקרקע נותר מטען חיובי. התהליך דומה לתהליך ההשראה החשמלית הקורה במסרק ובפיסת הנייר. הברק הוא הֶבְזֵק אדיר, הנוצר כאשר האלקטרונים שבענן נמשכים אל המטענים החיוביים שעל פני הקרקע.

נשק במלחמה נגד הברק ונגד ניצוצות אחרים

לברק יכולות להיות תוצאות הרסניות. פגיעת ברק בבני-אדם או בבעלי-חיים – יכולה להיות קטלנית. מִתְקָנִים עלולים ליהרס, כתוצאה מפגיעת ברק. כדי למנוע זאת, מציבים במקומות בולטים כליאי ברק. כליא ברק הוא מוט מתכת, ובו עוברים האלקטרונים אל האדמה בשעת ברק בלי לגרום נזק. באיור 1-24 מתואר כליא ברק.



איור 1-24 כליא הברק משמש למעבר אלקטרונים בשעת ברק

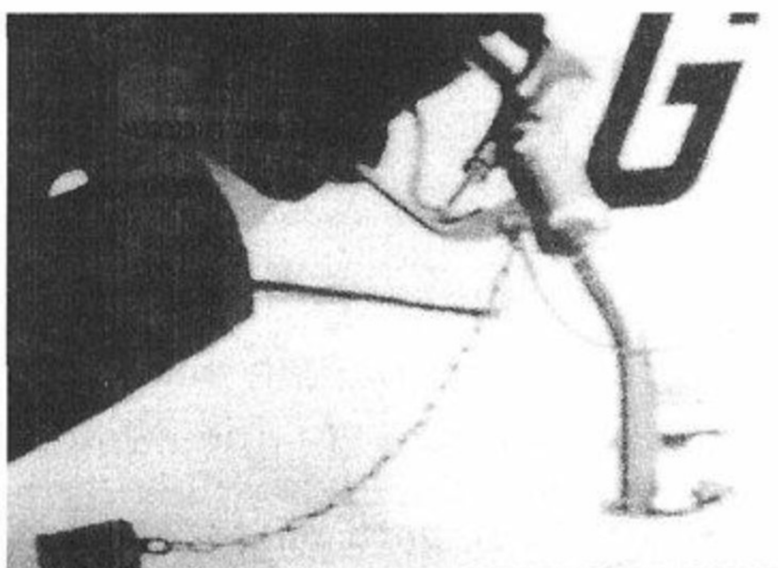
עכשיו אנו יכולים להבין כמה מסוכן היה הניסוי שערך בנימין פרנקלין (שעליו סיפרנו בתחילת הפרק). למעשה, פרנקלין החזיק בידיו כליא ברק, והאלקטרונים עלולים היו לעבור דרך גופו בשעת ברק, ולגרום לו נזק חמור.

מטען חשמלי עלול להיות מסוכן לא רק כתוצאה מתופעות טבעיות, כדוגמת הברק. גם משאיות עלולות להיטען, בגלל החיכוך שבין הגלגלים לכביש בעת הנסיעה. עקב המטען החשמלי המצטבר, יכול להיווצר ניצוץ, העלול לגרום לאסון, במיוחד במְכליות דלק.

כדי להימנע מניצוצות כאלה, מחברים למשאית שרשרת (או רצועה), הנגררת על הכביש. המטען העודף עובר לאדמה דרך השרשרת, בלי לגרום נזק.

וממשאיות – למטוסים. כאשר מתדלקים מטוס, יכולים להיווצר מטענים גדולים. המטענים יכולים לגרום להיווצרות ניצוצות, והמטוס עלול להתלקח כתוצאה מכך. גם במקרה זה מחברים שרשרת, כך שהמטען העודף עובר לאדמה דרך השרשרת, בלי לגרום נזק. באיור 1-25 רואים תדלוק כזה של מטוס.

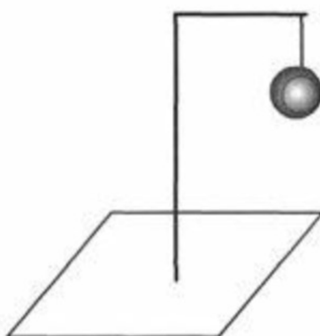




איור 1-25 קצה אחד של השרשרת מחובר לידית התדלוק, והקצה השני שלה מחובר לאדמה. חיבור כזה של השרשרת – מונע היווצרות ניצוצות מסוכנים

1.8 השדה החשמלי והמחשתו החזותית

עסקנו כבר בפרק זה בפעולה של כוחות חשמליים. כדי להבין טוב יותר את אופן הפעולה של הכוחות החשמליים, נשתמש בכדור טעון התלוי על חוט (איור 1-28). נכנה את הכדור הטעון בשם **כדור בּוֹחַן**. נתאר לעצמנו שאנו שמים את כדור הבוחן בחדר, המשמש לנו מעבדת ניסוי לגילוי תופעות חשמליות. נניח שבחדר נמצא רק כדור הבוחן. נציב את כדור הבוחן במקומות שונים בחדר. בכל מקום בחדר – הכדור יישאר במנוחה.



איור 1-26 כדור בוחן

נוציא מהחדר את כדור הבוחן, נכניס לחדר מטען נוסף, נכניס שוב את כדור הבוחן לחדר, ונציב אותו באותם מקומות כמקודם. נראה כי כדור הבוחן יסטה ממצב המנוחה שלו – בכל נקודה ונקודה בחדר. לא נדון בגודל המטען של כדור הבוחן ושל המטען הנוסף. נציין רק כי עדיף, בדרך-כלל, שהמטען הנוסף יהיה גדול – בהשוואה לגודל המטען של כדור הבוחן.

ההסבר המתבקש הוא, שהכנסת המטען הנוסף לחדר – גרמה לשינוי בסביבתו של מטען זה; כי אחרי שהכנסנו לחדר את המטען הנוסף, "הרגיש" כדור הבוחן במשהו, שלא היה שם, כשהמטען הנוסף לא היה בחדר.

נוכל לומר כי בגלל הכנסת המטען הנוסף לחדר, סביבת המטען הנוסף "רכשה" תכונה חדשה, שלא הייתה לה קודם לכן. באופן כללי, נאמר כי המרחב – אשר סביב המטען – רכש תכונה חדשה. תכונה זו מתבטאת בכך, שכוח חשמלי פועל על מטען חשמלי, הנמצא במרחב זה. לתכונה זו אנו קוראים **שדה חשמלי** (electric field), ואנו אומרים כי המטען הנוסף יצר שדה חשמלי במרחב.

לא רק מטען בודד יוצר שדה חשמלי, אלא כל מספר של מטענים. באופן כללי נוכל לומר, שמערכת מטענים יוצרת שדה חשמלי. נסכם את התמונה, המתקבלת מהסברנו על תהליך פעולת הכוחות החשמליים:

מערכת מטענים כלשהי (כולל האפשרות של מטען בודד) יוצרת שדה חשמלי במרחב. שדה חשמלי זה מפעיל כוח על מטען, המצוי בנקודה כלשהי במרחב זה. מכאן שהשדה החשמלי הוא מֵעין "מתווך", אשר באמצעותו מתבצע תהליך הפעלת הכוח בין המטענים.

שדה חשמלי נוצר אפוא בגלל קיומם של מטענים במרחב. כדי לוודא כי שדה חשמלי קיים בנקודה מסוימת, ניתן לשים מטען בנקודה המתאימה, ולבדוק אם כוח חשמלי פועל על מטען זה.

האם שדה חשמלי יכול להתקיים בנקודה מסוימת, גם אם אין שום מטען באותה נקודה?

כן. בנקודה מסוימת יכול להתקיים שדה חשמלי, גם אם אין שום מטען באותה נקודה. תפקיד המטען, ששמים בנקודה הנדונה, הוא לבדוק את קיומו של השדה החשמלי באותה נקודה.

עתה, לאחר שניסחנו את חוק קולון, ואנו יודעים לחשב את הכוח הפועל בין שני מטענים – נוכל לבטא באופן מדויק גם את גודל התכונה, הנקראת **שדה חשמלי** (electric field). גודל השדה החשמלי (או: עוצמת השדה החשמלי) בנקודה מסוימת, מוגדר כגודל **הכוח החשמלי, שהיה פועל על יחידת מטען חיובי, אילו הונחה באותה נקודה.**

נסמן ב-F את גודל הכוח החשמלי; נסמן ב-q את המטען, שאנו מניחים בנקודה מסוימת; ונסמן ב-E את גודל השדה החשמלי באותה נקודה. אילו הונח מטען חיובי q בנקודה מסוימת, ועל המטען היה פועל כוח חשמלי שגודלו F, גודל השדה החשמלי באותה נקודה הוא – לפי הגדרת השדה החשמלי – היחס בין הכוח למטען, כלומר:

$$E = \frac{F}{q} \qquad (1\text{-}2)$$

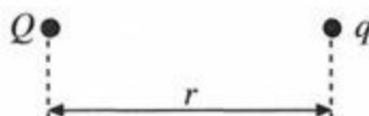
יחידת השדה החשמלי היא $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$ (ניוטון לקולון) בשיטת SI. נוסף לגודל של השדה החשמלי, אנו מייחסים כיוון לשדה זה. כיוון השדה החשמלי בנקודה מסוימת – מוגדר כ**כיוון הכוח החשמלי, שיפעל על יחידת מטען חיובי, אילו הונחה בנקודה הנדונה.**

מדוע "אילו הונחה בנקודה הנדונה"? מדוע לא להניח ממש מטען חיובי בנקודה הנדונה?

נניח כי בנקודה מסוימת יש שדה חשמלי. נשים מטען חשמלי באותה נקודה. אותו מטען יוצר בעצמו שדה חשמלי, כך שהשדה החשמלי המתקבל – שונה מהשדה החשמלי המקורי.

כאשר נרצה אפוא לבדוק – באמצעות מטען – את קיומו של שדה חשמלי, עלינו להשתמש במטען קטן דַּיּוֹ, כך שהשדה החשמלי – שמטען זה עצמו יוצר, יהיה זניח בהשוואה לשדה החשמלי המקורי. מטען קטן, שבאמצעותו בוחנים את השדה החשמלי בנקודה מסוימת, נקרא **מטען בּוֹחֵן**. מקובל להשתמש במטען בוחן חיובי.

כאמור, שדה חשמלי נוצר על-ידי מערכת מטענים, והמערכת הפשוטה ביותר היא מטען בודד. השדה החשמלי, הנוצר על-ידי מטען בודד Q, ניתן לחישוב באופן מִיָּדִי. נתבונן לשם כך באיור 1-27, שבו מתואר מטען בוחן q, הנמצא במרחק r מהמטען Q.



איור 1-27 מטען בוחן q הנמצא במרחק r ממטען Q

לפי חוק קולון – משוואה (1-1), הכוח שיפעל על מטען הבוחן הוא

$$F = k\frac{Qq}{r^2}$$

השדה החשמלי, הנוצר על-ידי המטען Q, יתקבל על-ידי חלוקת הכוח F במטען הבוחן q:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{k\frac{Qq}{r^2}}{q} = k\frac{Q}{r^2} \qquad (1\text{-}3)$$

מטען הבוחן עצמו יוצר שדה חשמלי (ובעצם, כל מטען יוצר שדה חשמלי). האם שדה חשמלי זה פועל על מטען הבוחן עצמו? נושא זה חורג בהרבה ממסגרת לימודינו, ולא נעסוק כאן אפוא בשאלה זו.



דוגמה 1-5

בנקודה מסוימת A בשדה חשמלי, הנוצר על-ידי מטען בודד, פועל כוח חשמלי של 2×10^{-2} N על מטען של 4×10^{-7} C.

א. חשב את עוצמת השדה בנקודה זו.

ב. חשב את גודל המטען Q, היוצר את השדה החשמלי, אם הנקודה A נמצאת במרחק 30 cm מהמטען.

פתרון

א. לפי הסברנו, עוצמת השדה החשמלי שווה לגודל הכוח, הפועל על יחידת מטען:

$$E=\frac{F}{q}=\frac{2\times10^{-2}}{4\times10^{-7}}=5\times10^{4}\quad\frac{\text{N}}{\text{C}}$$

ב. נשתמש במשוואה (1-3), ונקבל כי המטען Q יהיה $Q=\frac{Er^2}{k}$.

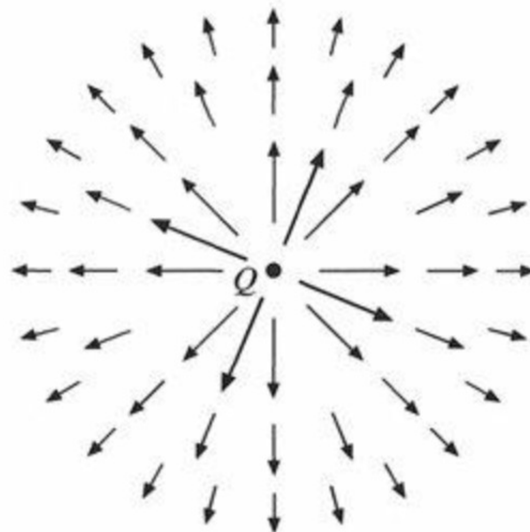
נציב את ערכו של E, שחישבנו בסעיף א של הפתרון, ואת הערך הנתון של המרחק ($r=30\text{ cm}=0.3\text{ m}$), ונקבל:

$$Q=\frac{Er^2}{k}=\frac{5\times10^{4}\times(0.3)^2}{9\times10^{9}}=5\times10^{-7}\quad\text{C}$$



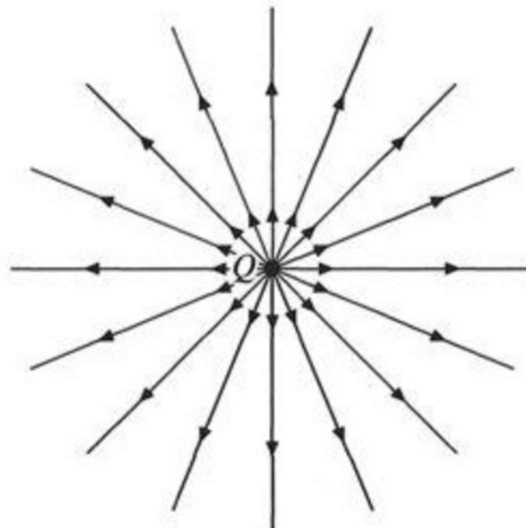
הסברנו אמנם את מהות השדה החשמלי, אך המושג **שדה חשמלי** הוא מופשט במידת-מה. אפשר שלפעמים יֵקל עלינו לעסוק בשדה החשמלי, אם נוכל להמחיש אותו. ואכן קיימת המחשה חזותית של השדה החשמלי. נסביר את העקרונות של המחשה זאת, תוך "התבוננות" בשדה החשמלי הנוצר על-ידי מטען בודד. נתבונן אפוא במטען חיובי Q, הנתון בנקודה מסוימת. כדי לתאר את השדה החשמלי, שמטען זה יוצר סביבו, נתאר לעצמנו מטען בוחן חיובי, המועבר ממקום למקום בסביבתו של המטען הקבוע.

בכל מקום, שבו נניח את מטען הבוחן, הוא "ירגיש" בשדה חשמלי, שכיוונו מן המטען Q – כלפי חוץ. אם בכל נקודה במרחב נשרטט חץ, המייצג את כיוון השדה באותה נקודה, כל החִצים יהיו מכוּוָנים כלפי חוץ, כמתואר באיור 1-28. בסיסי החִצים יוצאים מהנקודות, שבהן הנחנו את מטען הבוחן. אורך כל חץ באיור זה – אמור להיות ביחס ישר לעוצמת השדה בנקודה, שממנה יוצא החץ (קנה-המידה אינו אחיד באיור זה).



איור 1-28 חִצִים המראים את כיוון השדה החשמלי בנקודות שונות; אורך כל חץ אמור להיות ביחס ישר לעוצמת השדה בנקודה, שממנה יוצא החץ

אם נחבר עתה את החִצִים הנפרדים – על-ידי קווים ישרים ה"מוקרנים" מן המטען Q – החוצה, תתקבל תמונה של השדה החשמלי, הנוצר על-ידי מטען בודד. לקווים אלה נוסיף חִצִים (כמו באיור 1-29), המצביעים על כיוונו של השדה החשמלי, כלומר: על כיוון הכוח החשמלי, שהיה פועל על מטען חיובי, אילו הונח בשדה החשמלי. הקווים הללו נקראים **קווי שדה** (field lines).



איור 1-29 קווי שדה סביב מטען חיובי

הנה הערות אחדות לגבי קווי שדה חשמלי סביב מטען יחיד (חיובי או שלילי):

- המטען Q (איור 1-29) חיובי, וכך גם מטען הבוחן . כיוון הכוח, הפועל על מטען הבוחן, הוא אפוא מהמטען Q, ולכיוון מטען הבוחן. כך גם כיוון קווי השדה החשמלי. את מטען הבוחן שמים אותו במקומות שונים בשדה החשמלי, ומקבלים קווי שדה חשמלי בכיוונים שונים, כך שכל קו שדה חשמלי יוצא מהמטען Q, יוצר השדה החשמלי.

- קווי השדה סביב מטען שלילי – הפוכים בכיוונם לאלה של קווי השדה החשמלי סביב מטען חיובי. כלומר, קווי השדה החשמלי **נכנסים** אל המטען השלילי, וכיוון החִצים – במקרה זה – הפוך לזה שבאיור 1-29.

- קווי השדה החשמלי סביב מטען חיובי – הם קווים ישרים, כפי שרואים באיור 1-29. כך גם לגבי קווי השדה החשמלי סביב מטען שלילי.

- אנו רואים כי קווי השדה החשמלי צפופים יותר סמוך למטען שבאיור 1-29 – מאשר רחוק יותר מהמטען.

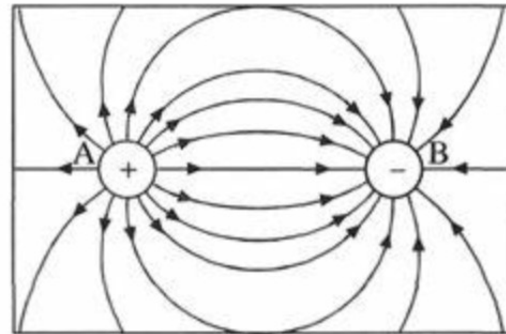
בעצם, היו צריכים להיות אינסוף קווי שדה חשמלי סביב מטען יחיד (חיובי או שלילי), אך מסתפקים בכמה קווי שדה חשמלי לצורך המחשת השדה החשמלי. נניח כי צפיפות קווי השדה החשמלי בתחום מסוים – נמצאת ביחס ישר לגודל השדה החשמלי באותו תחום. בהתאם לצפיפות קווי השדה החשמלי, ניתן יהיה אפוא לקבל מושג על גודל השדה החשמלי באותו תחום.

ואמנם, מסרטטים את קווי השדה החשמלי, כך שצפיפותם תהיה ביחס ישר לגודל השדה החשמלי בתחום המתאים. ניתן אפוא להראות – באמצעות קווי השדה החשמלי – לא רק את כיוון השדה החשמלי, אלא גם את גודל השדה החשמלי בתחום מסוים. דוגמה לכך ניתן לראות באיור 1-29. גודל השדה החשמלי זהה בכל כיוון סביב מטען יחיד, ולכן יש באיור זה – מספר זהה של קווי שדה חשמלי בכל כיוון.

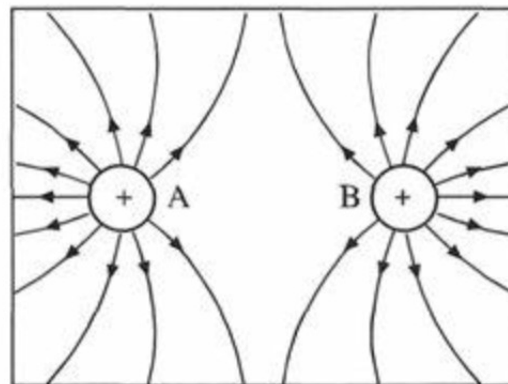
האם רק לשדה חשמלי יש גודל וכיוון? כאמור, ניתן לאפיין את השדה החשמלי – הן על-ידי גודלו והן על-ידי כיוונו. תכונה זו אינה בלעדית לשדה החשמלי. גם לכוח ולמהירות, למשל, יש גודל וכיוון, וכל אחד מהם הוא **וקטור**. אגב, מטען חשמלי מאופיין על-ידי ערך מספרי בלבד, והוא דוגמה ל**סְקָלָר**. גם אנרגיה היא סְקָלָר.

עד כה המחשנו את השדה החשמלי, הנוצר על-ידי מטען יחיד. נמחיש עתה את קווי השדה החשמלי של זוגות מטענים. גם כאן ניתן לתאר את השדות באמצעות קווי שדה חשמלי,

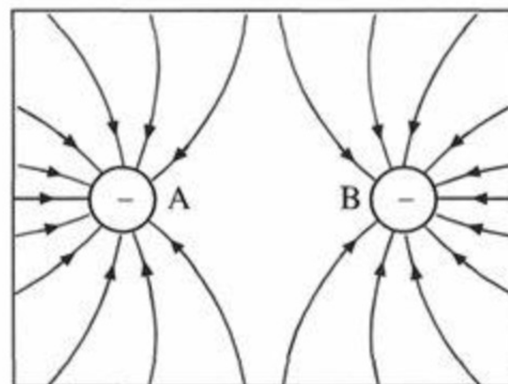
אלא שקווים אלה אינם בהכרח קווים ישרים. באיור 30-1א מתוארים קווי שדה חשמלי של מטענים שווים בגודלם.



א – קווי שדה סביב זוג מטענים שווים בגודלם והפוכים בסימנם



ב – קווי שדה סביב זוג מטענים חיוביים ושווים

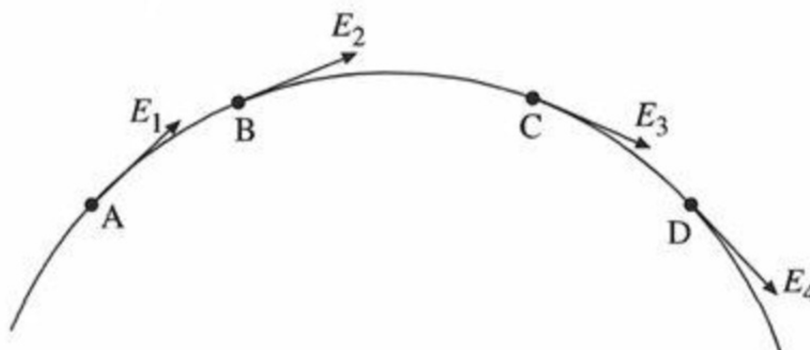


ג – קווי שדה סביב זוג מטענים שליליים ושווים

איור 30-1 קווי שדה סביב זוגות מטענים שווים בגודלם

קווי השדה החשמלי באיור 30-1א – יוצאים ממטען חיובי, ומסתיימים במטען שלילי (קווי השדה החשמלי של מטען יחיד – אינם מסתיימים במטען שלילי, אלא באינסוף (לכאורה), כפי שניתן לראות באיור 29-1).

כדי לדעת מהו כיוון השדה החשמלי בנקודה כלשהי, הנמצאת על קו שדה חשמלי, עלינו להעביר משיק לקו בנקודה זו. כיוון המשיק בנקודה הוא ככיוון הכוח החשמלי, שיפעל על מטען חיובי, אם ישימו אותו בנקודה זו; כלומר: כיוון המשיק הוא ככיוון השדה החשמלי בנקודה זו. באיור 1-31 מודגם כיצד ניתן למצוא את כיוון השדה החשמלי בנקודות שונות על קו שדה חשמלי. למשל: כיוון המשיק E_2 הוא ככיוון השדה החשמלי בנקודה B.



איור 1-31 הכיוון של שדה חשמלי בנקודות שונות שעל קו שדה חשמלי

איך מתווים את קווי השדה של מערכת מטענים?

לפעמים, אין משתמשים במטען בוחן, ואין מודדים את הגודל והכיוון של השדה החשמלי בנקודות שונות במרחב, אלא מחשבים (באמצעות מחשב, למשל) את השדה החשמלי בנקודות שונות, ומסרטטים את קווי השדה המתאימים.

 ## שאלות חזרה 

שאלה 1-16

מטען Q יוצר שדה חשמלי. גודל השדה החשמלי – במרחק 10 m ממטען זה – הוא $5\frac{N}{C}$.

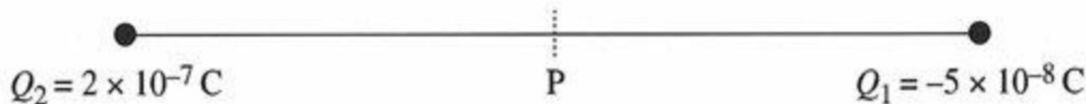
א. מה יהיה גודל השדה החשמלי במרחק 20 m מהמטען Q?

ב. באיזה מרחק מהמטען Q יהיה השדה החשמלי $20\frac{N}{C}$?

ג. מה גודל המטען Q?

שאלה 1-17

המרחק בין שני מטענים, Q_1 ו-Q_2 (איור 1-32) הוא 20 cm. מה גודל השדה בנקודה P, הנמצאת באמצע הקטע, המחבר את שני המטענים?



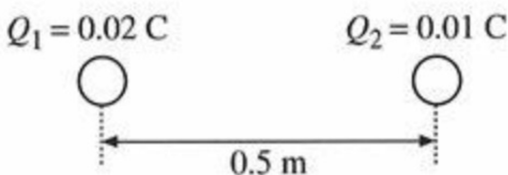
איור 1-32

שאלה 1-18

נתונים שני מטענים: $Q_1 = 0.02$ C, $Q_2 = 0.01$ C. המרחק בין המטענים הוא 0.5 m (איור 1-33).

א. סמן את הנקודה, על הקטע המחבר את שני המטענים (או על המשכו), שבה מתאפס השדה החשמלי.

ב. חזור על הסעיף הקודם, אלא שהפעם $Q_2 = -0.01$.



איור 1-33

סיכום פרק 1

- קיימים שני סוגי מטענים. מטענים מאותו סוג (חיוביים או שליליים) – דוחים זה את זה, ואילו מטענים מסוגים שונים – מושכים זה את זה.

- מקורות המטען החשמלי הם החלקיקים היסודיים הטעונים, הנמנים עם מרכיבי האטום.

- הפרוטון טעון מטען חשמלי חיובי, והאלקטרון טעון מטען חשמלי שלילי. שני המטענים הללו שווים בגודלם.

- המטען החשמלי של גוף – נקבע על-פי מספר האלקטרונים העודפים או החסרים בו, בהשוואה למספר הפרוטונים שבו. לגוף טעון שלילית – יש עודף אלקטרונים, ולגוף טעון חיובית – יש פחות אלקטרונים מאשר פרוטונים.

- גודלו של הכוח החשמלי F, הפועל בין שני מטענים, Q_A ו-Q_B, הנמצאים במרחק r זה מזה, נתון על-ידי חוק קולון: $F = k\frac{Q_A Q_B}{r^2}$. המטענים נמדדים בקולון (C) – בשיטת היחידות SI – המרחק נמדד במטרים (m), הכוח (F) – בניוטון (N), ואז $k = 9\times10^9\ \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$.

- מטענים חשמליים יוצרים שדה חשמלי במרחב. גודל השדה החשמלי E בנקודה כלשהי – שווה ליחס בין גודל הכוח החשמלי F, שהיה פועל על מטען בוחן חיובי q, אילו הונח באותה נקודה, לבין גודלו של מטען זה: $E = \frac{F}{q}$.

- גודל השדה החשמלי, הנוצר על-ידי מטען בודד Q – במרחק r מהמטען – נתון על-ידי $k\frac{Q}{r^2}$.

- השדה החשמלי ניתן לתיאור חזותי בעזרת קווי שדה.

- ניתן להפריד מטענים באמצעות השראה אלקטרוסטטית.

2

מתחים וזרמים חשמליים

2.1 פוטנציאל ומתח

ראינו שכל שני מטענים מפעילים כוח חשמלי זה על זה. ככל שהמטענים קרובים יותר, הכוח גדול יותר, וככל שהמרחק ביניהם גדול יותר, הכוח קטן יותר. ראינו גם שמטענים שְׁוֵוי-סימן דוחים זה את זה, ומטענים שׁוֹנֵי-סימן מושכים זה את זה.

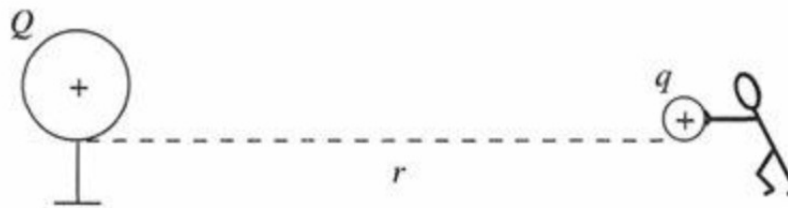
עכשיו נבדוק מה קורה, כאשר מקרבים מטען אחד למטען אחר. לשם כך נשים גוף, הטעון במטען חיובי Q, במקום כלשהו, ונניח שהגוף הטעון הזה אינו יכול לזוז ממקומו. כעת נקרב אל המטען Q גוף אחר, הטעון במטען חיובי q. אנו רוצים להראות, שכדי לקרב את המטען q אל המטען Q, צריך להשקיע אנרגיה.

נניח כי המטען q היה בהתחלה במצב מנוחה, ובמרחק גדול מאוד מהמטען Q, כך ששום כוח לא פעל, למעשה, על המטען q (איור 2-1).



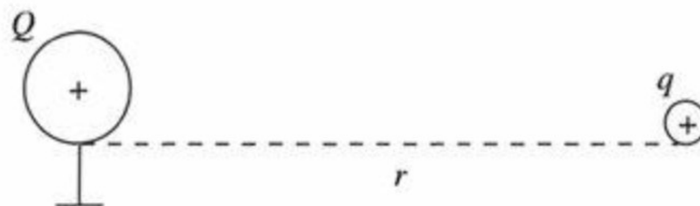
איור 2-1 מטען חיובי q מרוחק מרחק גדול מאוד מהמטען החיובי Q

נניח שאנו רוצים לקרב את המטען q עד למרחק r מהמטען Q. מאחר שהמטען החיובי Q מפעיל כוח דחייה על המטען החיובי q, צריך להפעיל על המטען q כוח נגדי, כדי לקרב אותו אל המטען Q (איור 2-2).



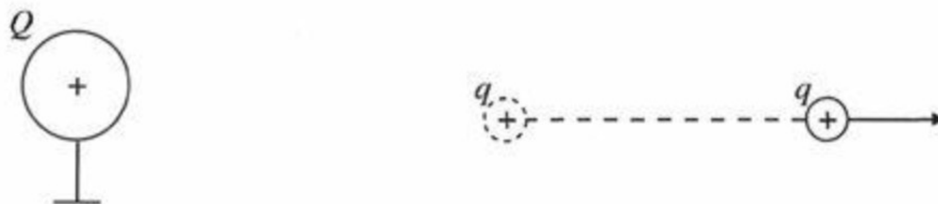
איור 2-2 כדי לקרב את המטען q למטען Q יש להפעיל כוח, כדי להתגבר על כוח הדחייה.

כאשר עוזבים את הגוף, הטעון במטען q, בנקודה המרוחקת מרחק r מהמטען Q, הגוף מתחיל לנוע ולהתרחק מהמטען Q, כתוצאה מכוח הדחייה שבין הגופים (איור 2-3).



איור 2-3 כאשר עוזבים את המטען q, הוא מתחיל לנוע בכיוון החץ ולהתרחק מהמטען Q

הגוף הטעון, שמטענו q, רוכש מהירות (איור 2-4), ויש לו עכשיו **אנרגיה קינטית** (אנרגיה הקשורה לתנועה).



איור 2-4 המטען q מתרחק מהמטען Q ורוכש אנרגיה קינטית

כאמור, לגוף הטעון במטען q, לא הייתה בהתחלה אנרגיה, כי הוא היה במצב מנוחה ובמרחק גדול מהמטען Q. כשעזבנו את המטען q, לאחר שקירבנו אותו למטען Q, הייתה לו אנרגיה קינטית. כידוע, אנרגיה אינה נוצרת יש מאין, לכן המסקנה היא, שתוך כדי קירוב המטען q למטען Q, כנגד כוח הדחייה, המטען q רכש אנרגיה, ואנו שדחפנו את המטען השקענו בו אנרגיה זו.

אנרגיה פוטנציאלית חשמלית

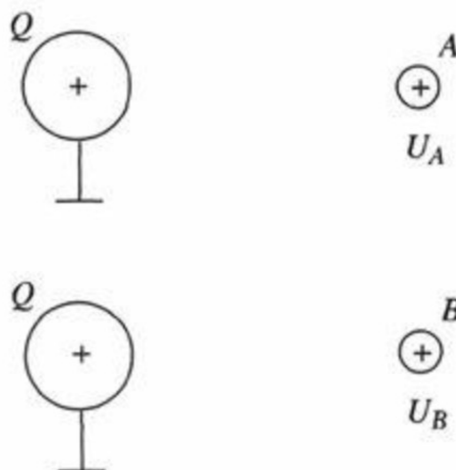
ככל שנקרב יותר את המטען q למטען Q בדוגמה שלנו, נצטרך להשקיע במטען q עוד ועוד אנרגיה, ולכן המטען q ירכוש אנרגיה גדולה יותר. אנו רואים כי האנרגיה של המטען q תלויה במרחקו של המטען q מהמטען Q, או במילים אחרות: במיקום של המטען q ביחס למטען Q.

נזכיר כי האנרגיה של גוף, התלויה במיקום הגוף, נקראת **אנרגיה פוטנציאלית**. כעת אנו עוסקים באנרגיה פוטנציאלית, הקשורה בכוחות חשמליים. לכן אנרגיה זו נקראת **אנרגיה פוטנציאלית חשמלית**. נסיק אם-כן, כי על-ידי קירוב המטען q למטען Q, הענקנו למטען q אנרגיה פוטנציאלית חשמלית.

נגדיר עכשיו מושג חדש: **הפוטנציאל**.

האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של יחידת מטען בנקודה מסוימת נקראת ***הפוטנציאל*** *באותה נקודה* (אין, למעשה, הבדל בין "אנרגיה של יחידת מטען - לבין "אנרגיה ליחידת מטען").

כיצד מסמנים פוטנציאלים? הפוטנציאל בנקודה A מסומן על-ידי U_A; והפוטנציאל בנקודה B מסומן על-ידי U_B (איור 2-5). אם בשתי הנקודות יש פוטנציאלים חשמליים שונים, אומרים כי יש ביניהן הפרש פוטנציאלים.



איור 2-5 הפוטנציאל בנקודה A הוא U_A, והפוטנציאל בנקודה B הוא U_B.
אם $U_B \neq U_A$, יש – כמובן – הפרש פוטנציאלים בין הנקודות A ו-B

נגדיר עכשיו עוד מושג: **המתח**.

המתח החשמלי בין הנקודות A ו-B הוא הפרש הפוטנציאלים בין הנקודות האלה.

הכרנו כבר בלימודים קודמים את מושג האנרגיה הפוטנציאלית. למעשה, עסקנו באנרגיה פוטנציאלית של גובה, שקראנו לה גם אנרגיית גובה. ראינו שאנרגיית הגובה של גוף תלויה במרחקו מפני הקרקע, כלומר בגובה.

עוד למדנו שכדור-הארץ מושך גופים, וכתוצאה מכך גופים נעים - אם לא מפריעים להם - ממקום גבוה למקום נמוך, כלומר: ממקום בעל פוטנציאל גבוה, למקום בעל פוטנציאל נמוך. הפוטנציאל בנקודה A גדול יותר מהפוטנציאל בנקודה B, כי הנקודה A גבוהה יותר מהנקודה B.



יחידת המתח

את המתח בין A ל-B נסמן על-ידי U_{AB}, ונקבל כי:

$$U_{AB} = U_A - U_B \qquad (2\text{-}1)$$

יחידת הפוטנציאל היא הוולט, וזוהי גם יחידת המתח. יחידה זאת מסומנת באות V. ראינו שהפוטנציאל בנקודה מסוימת הוא האנרגיה (הפוטנציאלית) של יחידת מטען בנקודה זו. מאחר שהאנרגיה נמדדת ביחידת ג׳ול (או ג׳אול) והמטען נמדד בקולון, נובע מכך שיחידת המתח היא

$$1\ \text{V} = \frac{1\ \text{ג׳ול}}{1\ \text{קולון}}$$

כלומר, וולט אחד שווה לג׳ול אחד חלקי קולון אחד.

על הוויכוח בין גַלְוָונִי לבין ווֹלְטָה לגבי מקור החשמל

לואיג'י גלווני (1827-1745)



אלסנדרו וולטה (1798-1737)



גלווני היה רופא ופיזיקאי איטלקי. ניסוייו כללו ניתוח צפרדעים. בשעת אחד הניסויים במעבדתו, ניתזו ניצוצות ממכונת חשמל סמוכה, וגרמו להתכווצות ברגל של צפרדע. בניסוי אחר קשר גלווני רגלי צפרדע בְּוָו פליז (חומר העשוי מנחושת ואבץ), ותלה את הַוָו על גדר ברזל. בכל פעם שרגל הצפרדע נגעה בגדר, הרגל התכווצה מאוד.

גלווני הסיק מניסוייו כי יש חשמל הנוצר בבעלי-חיים, וחשמל זה הוא הגורם להתכווצות השריר. מתברר כי הסבר זה לא היה נכון (אך גם לא לגמרי מוטעה), ועל כך תוכלו לקרוא בהמשך – בסיפור על וולטה.

ניסוייו של גלווני תרמו לפיתוח ענפים שונים בחשמל וגם ברפואה. תהליך ציפוי מתכות נקרא על שמו. יש מד זרם, הנקרא על שמו, וגם תא חשמלי על שם גלווני.

וולטה היה חברו של גלווני, וגם הוא היה פיזיקאי איטלקי. הוא חזר על הניסויים של גלווני, וערך אותם בחיות נוספות. המסקנה שלו מהניסויים הייתה שונה מזו של גלווני. וולטה טען שהעצב והשריר של הצפרדע מאפשרים את מעבר החשמל, ההתכווצות נובעת מחיבור מתכות שונות לשוק של הצפרדע, והשרירים מספקים את הלחות הדרושה לתהליך.

כדי להוכיח את טענתו, הניח וולטה מטבע כסף על מטבע אבץ, וביניהם שם חתיכות קרטון רטוב. ואמנם, וולטה קיבל תוצאות דומות לאלה שנערכו בבעלי-החיים: בקצות ההתקן של וולטה – נוצר מתח חשמלי. בכך הוכיח וולטה את צדקת טענתו.

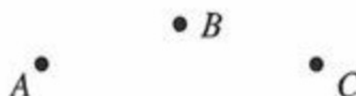
וולטה המציא את התא החשמלי, ויש תא הנקרא על שמו. גם יחידת המתח – וולט – נקראת על שמו.



דוגמה 2-1



נתונות הנקודות A, B ו-C, כפי שמתואר באיור 2-6. בגלל קיומם של מטענים שונים (שאינם מופיעים באיור), נוצר בנקודה A פוטנציאל של 14 V, בנקודה B – פוטנציאל של 8 V, ובנקודה C – פוטנציאל של 3 V. חשב את המתחים U_{AB}, U_{BC} ו-U_{AC}.



איור 2-6

פתרון

ראינו שהמתח U_{AB} נתון על-ידי משוואה (2-1):

$$U_{AB} = U_A - U_B$$

נציב במשוואה זו את הפוטנציאלים הנתונים, ונקבל:

$$U_{AB} = U_A - U_B = 14 - 8 = 6 \text{ V}$$

באופן דומה נקבל את שאר המתחים:

$$U_{BC} = U_B - U_C = 8 - 3 = 5 \text{ V}$$

$$U_{AC} = U_A - U_C = 14 - 3 = 11 \text{V}$$

אנו רואים שהמתח בין A ל-C הוא הגבוה ביותר (11 V), ואילו המתח בין B ל-C הוא הנמוך ביותר (5 V).



כיוון תנועת המטענים עקב הפרש פוטנציאלים

נחזור למטען החיובי q שבו עסקנו קודם. ראינו שכאשר עוזבים אותו, הוא נע למקום שבו הפוטנציאל נמוך יותר, בגלל כוח הדחייה של המטען החיובי Q.

באופן כללי נוכל לומר כי

מטען חיובי, החופשי לנוע בהשפעת מתח, נע מן הנקודה, שבה הפוטנציאל גבוה – אל הנקודה, שבה הפוטנציאל נמוך.

כיצד אפשר ליצור הפרש פוטנציאלים, כלומר, מתח, בין שתי נקודות A ו-B? אחת הדרכים היא להניח מטען חיובי Q בקרבת הנקודה A , ומטען שלילי $-Q$ בקרבת הנקודה B, כפי שמתואר באיור 2-7. אם נשים מטען חיובי q על הקו המחבר בין שתי הנקודות, הוא יזוז לעבר הנקודה B , ויתרחק מהנקודה A. פירוש הדבר שהפוטנציאל בקרבת המטען החיובי Q גבוה מהפוטנציאל בקרבת המטען השלילי $-Q$, ובין שני המטענים קיים הפרש פוטנציאלים, כלומר, מתח.



איור 2-7

בפרק הקודם ראינו שיש גופים, שכאשר משפשפים אותם זה בזה, אחד מהם נטען במטען חיובי, והשני נטען במטען שלילי. בדרך זו אפשר לקבל שני מטענים שווים בגודלם ובעלי סימנים שונים, שיש ביניהם הפרש פוטנציאלים.

אבל דרך זו להפריד בין מטענים חיוביים לשליליים – אינה יעילה. בהמשך נלמד על דרכים יעילות יותר להפרדת מטענים, כך שעל גוף אחד מצטבר מטען חיובי, ועל הגוף השני מצטבר מטען שלילי. כאמור, בין שני מטענים אלה נוצר מתח. התקן, המפריד מטענים בצורה כזאת, נקרא **מקור מתח**.

ראינו שאם יש מתח בין שתי נקודות, הרי שמטען חיובי – החופשי לנוע – נע מן הפוטנציאל הגבוה אל עבר הפוטנציאל הנמוך. ומה יקרה אם נשים מטען שלילי $-q$ בין שתי הנקודות?

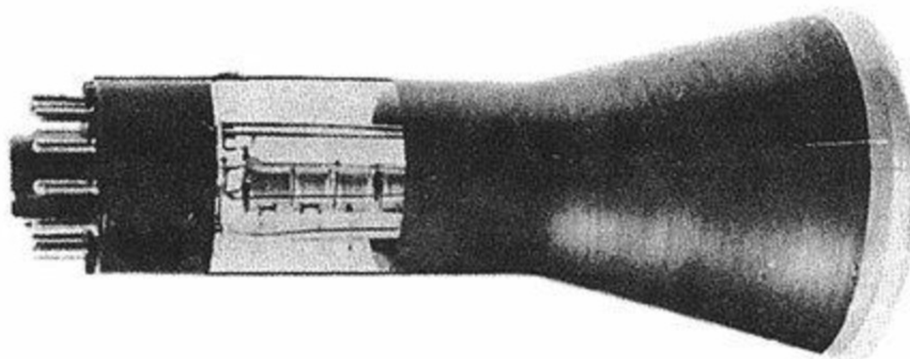
*אם נשים **מטען שלילי** $-q$, החופשי לנוע, בין שתי נקודות שביניהן קיים הפרש פוטנציאלים, הוא ינוע **מהנקודה שבה הפוטנציאל נמוך – אל הנקודה שבה הפוטנציאל גבוה יותר**.*

שפופרת קרן קתודית (שק"ק)

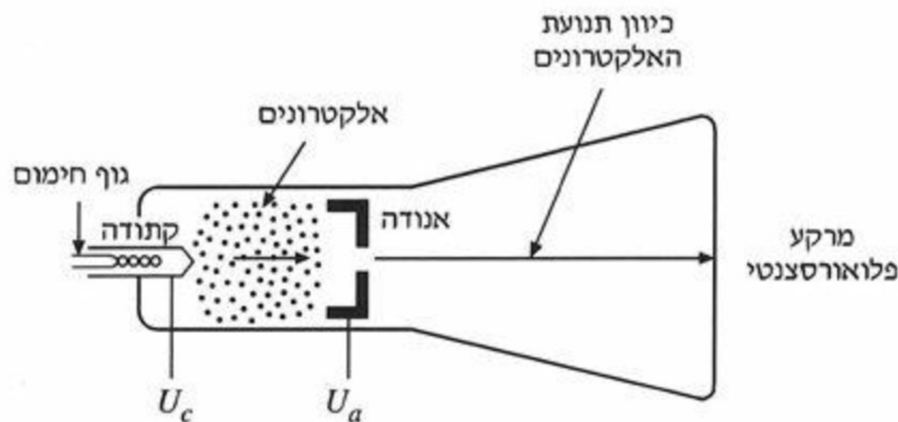
ראינו כי מתח בין שתי נקודות גורם לתנועת מטענים, החופשיים לנוע. משתמשים בתופעה זו בהתקן חשמלי נפוץ ביותר – שפופרת קרן קתודית – שהיא מרכיב מרכזי במקלט הטלוויזיה. באיור 2-8 נתון המראה החיצוני של השפופרת, ובאיור 2-9 מתוארים החלקים העיקריים של השפופרת, ובהם הקתודה והאנודה.

בין האנודה לקתודה יש הפרש פוטנציאלים. פוטנציאל הקתודה הוא U_c, ופוטנציאל האנודה הוא U_a. פוטנציאל הקתודה נמוך בהרבה מפוטנציאל האנודה, והמתח בין האנודה לקתודה הוא $U_{ac} = U_a - U_c$.

הקתודה עשויה מחומר כזה, שכאשר מחממים אותו, אלקטרונים נפלטים ממנו. בעת פעולת השפופרת, מחממים את הקתודה, ואלקטרונים נפלטים ממנה. בהשפעת המתח שבין האנודה לקתודה, האלקטרונים נעים לעבר האנודה, רוכשים מהירות, עוברים דרך החריץ שבאנודה, ומגיעים אל המרקע. זהו מרקע פלואורסצנטי: כאשר האלקטרונים פוגעים במרקע, נוצרות עליו נקודות מאירות (כל תמונה, שאנו רואים בטלוויזיה, מורכבת מנקודות מאירות רבות כאלה).



איור 8-2 המראה החיצוני של שפופרת קרן קתודית



איור 9-2 החלקים העיקריים של השפופרת וכיוון תנועת האלקטרונים בשפופרת

בהשפעת מתח חשמלי. אבל חלקיקים טעונים חופשיים אפשר למצוא לא רק במכשירים חשמליים משוכללים. בטבע קיים מצבור ענק של חלקיקים טעונים, החופשיים לנוע בהשפעת מתח חשמלי. חלקיקים אלה הם האלקטרונים, הנמצאים במתכות שונות, כגון: נחושת, כסף ואבץ, המצויות בשפע בטבע.

לפני שנלמד על תנועת האלקטרונים במתכות אלה – בהשפעת מקור מתח, נראה כיצד אפשר לבנות מקור מתח יעיל ושימושי.



שאלות חזרה



שאלה 2-1

בחר את המילים והביטויים הנכונים בקטע הבא:

כדי לקרב מטען שלילי $-q$ אל מטען שלילי $-Q$, **יש צורך/אין צורך** להתגבר על כוח הדחייה שבין המטענים. קירוב המטען $-q$ אל המטען $-Q$ **כרוך/אינו כרוך** בהשקעת אנרגיה.

שאלה 2-2

משחררים מטען שלילי $-q$ בקרבת מטען חיובי $+Q$, הקבוע במקומו.

א. האם המטען $-q$ יתקרב למטען $+Q$, או יתרחק ממנו?

ב. האם תנועת המטען $-q$ כרוכה בהשקעת אנרגיה? נמק.

שאלה 2-3

מהו פוטנציאל? סמן את התשובה הנכונה.

א. אנרגיה פוטנציאלית ליחידת מטען.

ב. מילת קיצור של "אנרגיה פוטנציאלית".

ג. כושר של גוף להיות טעון במטען חיובי או שלילי.

ד. מכפלת האנרגיה הפוטנציאלית במטען.

ה. כושר של גוף למשוך או לדחות מטענים חשמליים.

שפופרת הקרן הקתודית היא דוגמה למערכת שבה חלקיקים טעונים חופשיים נעים בהשפעת מתח חשמלי. אבל חלקיקים טעונים חופשיים אפשר למצוא לא רק במכשירים חשמליים משוכללים. בטבע קיים מצבור ענק של חלקיקים טעונים, החופשיים לנוע בהשפעת מתח חשמלי. חלקיקים אלה הם האלקטרונים, הנמצאים במתכות שונות, כגון: נחושת, כסף ואבץ, המצויות בשפע בטבע.

לפני שנלמד על תנועת האלקטרונים במתכות אלה – בהשפעת מקור מתח, נראה כיצד אפשר לבנות מקור מתח יעיל ושימושי.



שאלות חזרה



שאלה 2-1

בחר את המילים והביטויים הנכונים בקטע הבא:

כדי לקרב מטען שלילי $-q$ אל מטען שלילי $-Q$, **יש צורך/אין צורך** להתגבר על כוח הדחייה שבין המטענים. קירוב המטען $-q$ אל המטען $-Q$ **כרוך/אינו כרוך** בהשקעת אנרגיה.

שאלה 2-2

משחררים מטען שלילי $-q$ בקרבת מטען חיובי $+Q$, הקבוע במקומו.

א. האם המטען $-q$ יתקרב למטען $+Q$, או יתרחק ממנו?

ב. האם תנועת המטען $-q$ כרוכה בהשקעת אנרגיה? נמק.

שאלה 2-3

מהו פוטנציאל? סמן את התשובה הנכונה.

א. אנרגיה פוטנציאלית ליחידת מטען.

ב. מילת קיצור של "אנרגיה פוטנציאלית".

ג. כושר של גוף להיות טעון במטען חיובי או שלילי.

ד. מכפלת האנרגיה הפוטנציאלית במטען.

ה. כושר של גוף למשוך או לדחות מטענים חשמליים.

שאלה 2-4

סמן את המקום, שבו נכון להחליף את המילים המודגשות – במילה **מתח**.

האנרגיה של גוף, התלויה במיקום הגוף, נקראת **אנרגיה פוטנציאלית**. האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של יחידת מטען, בנקודה מסוימת, נקראת **הפוטנציאל** באותה נקודה. גוף טעון שלילית ינוע, בהשפעת **הפרש פוטנציאלים**, ממקום שבו **הפוטנציאל** נמוך, למקום שבו הפוטנציאל גבוה.

שאלה 2-5

"בהשפעת המתח בין האנודה לקתודה, האלקטרונים נעים לעבר האנודה." על-פי משפט זה, למי יש פוטנציאל גבוה יותר – לאנודה או לקתודה? נמק.

שאלה 2-6

הפוטנציאל בנקודה A הוא 6 V, והפוטנציאל בנקודה B הוא 2 V.

א. חשב את המתח U_{AB}.

ב. חשב את המתח U_{BA}.

ג. הראה כי $U_{BA} = -U_{AB}$.

ד. מצאנו כי $U_{BA} = -U_{AB}$. האם השוויון התקבל במקרה, או שהוא נכון לגבי כל שתי נקודות? חזור על החישוב לגבי ערכים שונים של הפוטנציאל בנקודה A ובנקודה B.

שאלה 2-7

בכל מקום שחסרה מילה צריך לכתוב גבוה או נמוך. השלם את החסר.

מטען חיובי, החופשי לנוע, ינוע מפוטנציאל ______ לפוטנציאל _____, ומטען שלילי, החופשי לנוע, ינוע מפוטנציאל _____ לפוטנציאל _____.

2.2 פוטנציאל, מתח ושדה חשמלי

כאמור בסעיף 1.8, השדה החשמלי הוא וקטור, והוא מתאר את המצב החשמלי בנקודות שונות של המרחב. גם הפוטנציאל מתאר את המצב החשמלי בנקודות שונות של המרחב, אלא שהפוטנציאל הוא סְקָלָר (ראינו כי הפוטנציאל החשמלי הוא האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של יחידת מטען בנקודה מסוימת. אנרגיה ומטען הם סְקָלָרִים, ומכאן שגם הפוטנציאל – שהוא מנה של שני סְקָלָרִים – הוא סְקָלָר).

לא נדון – במסגרת זאת – בשאלה, אילו בעיות מחקר ואילו שאלות עדיף לנסות לפתור באמצעות שדה חשמלי, ואילו שאלות עדיף לפתור באמצעות פוטנציאל. כאן נחזור ונציין כי גודל השדה החשמלי – הנוצר על-ידי מטען Q, ובמרחק r ממטען זה – נתון על-ידי משוואה (3-1):

$$E = k\frac{Q}{r^2}$$

ניתן להראות כי הפוטנציאל בנקודה, המרוחקת מרחק r ממטען Q, נתון על-ידי

$$U = k\frac{Q}{r} \qquad (2\text{-}2)$$

ומכאן שהקשר בין גודל השדה החשמלי לבין הפוטנציאל – בנקודה, המרוחקת מרחק r ממטען Q – הוא

$$E = \frac{U}{r} \qquad (2\text{-}3)$$

נניח עתה כי לאורך קטע – המחבר בין שתי נקודות, שהמרחק ביניהן d – קיים שדה חשמלי אחיד (כלומר: שדה חשמלי קבוע בגודלו ובכיוונו) E. ניתן להראות כי לאורך הקטע שבין שתי הנקודות – קיים הפרש פוטנציאלים U, והקשר בין גודל השדה החשמלי האחיד לבין הפרש הפוטנציאלים – הוא

$$E = \frac{U}{d} \qquad (2\text{-}4)$$

נוכל לתאר זאת גם בצורה "הפוכה": נניח כי לאורך קטע – המחבר בין שתי נקודות, שהמרחק ביניהן d – קיים הפרש פוטנציאלים U. אם בין הנקודות קיים שדה חשמלי אחיד, נקבל אותו קשר בין גודל השדה החשמלי האחיד – לבין הפרש הפוטנציאלים $\left(E = \frac{U}{d}\right)$.



דוגמה 2-2

בשדה חשמלי אחיד קיים הפרש פוטנציאלים של 220 V בין שתי נקודות, המרוחקות 5 ס"מ זו מזו. מה גודל השדה החשמלי בקטע, שבין שתי נקודות אלה?

פתרון

גודל השדה החשמלי הוא – לפי משוואה (2-4),

$$E = \frac{U}{d}$$

נבטא את הנתונים במערכת היחידות SI (נהפוך את הסנטימטרים למטרים), נציב את הנתונים במשוואה שלמעלה, ונקבל:

$$E = \frac{U}{d} = \frac{220}{0.05} = 4400\frac{\text{V}}{\text{m}}$$

גודל השדה החשמלי בקטע שבין שתי הנקודות – הוא $4400\frac{V}{m}$.

כאמור, הפוטנציאל בנקודה, המרוחקת מרחק r ממטען Q, נתון על-ידי משוואה (2-2):

$$U = k\frac{Q}{r}$$



נניח כי במרחב יש שני מטענים: q_1, q_2. כן נניח כי המרחק של נקודה מסוימת A מהמטען q_1 הוא r_1; ומרחק אותה נקודה A מהמטען q_2 הוא r_2, כפי שמתואר להלן.



לפי המשוואה $U = k\frac{Q}{r}$, נקבל כי

הפוטנציאל, U_1, הנוצר בנקודה A על-ידי המטען q_1, הוא $U_1 = \frac{kq_1}{r_1}$ והפוטנציאל U_2,

הנוצר בנקודה A על-ידי המטען q_2, הוא $U_2 = \frac{kq_2}{r_2}$.

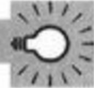
ניתן להראות כי הפוטנציאל U בנקודה A, כתוצאה משני המטענים, הוא סכום הפוטנציאלים באותה נקודה, כלומר:

$$U = U_1 + U_2 = \frac{kq_1}{r_1} + \frac{kq_2}{r_2} \qquad (2\text{-}5)$$

נניח כי במרחב יש n מטענים $(q_1, q_2, q_3, \ldots, q_n)$. המרחק של נקודה מסוימת A מהמטען q_1 הוא r_1; מרחק אותה נקודה A מהמטען q_2 הוא r_2; ומרחק הנקודה A מהמטען q_n הוא r_n. הפוטנציאל U בנקודה A, כתוצאה מ- n המטענים, הוא סכום הפוטנציאלים באותה נקודה, כלומר:

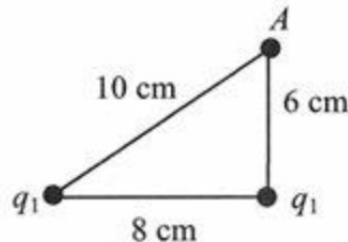
$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \ldots + U_n = \frac{kq_1}{r_1} + \frac{kq_2}{r_2} + \frac{kq_3}{r_3} + \ldots + \frac{kq_n}{r_n} \qquad (2\text{-}6)$$

ובכן, כדי לחשב את הפוטנציאל, הנוצר בנקודה מסוימת על-ידי מערכת מטענים, צריך לחשב את הפוטנציאלים הנוצרים בנקודה זו על-ידי המטענים הבודדים, ולסכם פוטנציאלים אלה – תוך הקפדה על סימני המטענים.



דוגמה 2-3

שני מטענים נקודתיים ($q_1 = 4 \times 10^{-6}$ C, $q_2 = -6 \times 10^{-6}$ C) מרוחקים זה מזה 8 cm. חשב את הפוטנציאל בנקודה A שלהלן.



פתרון

הפוטנציאל U_1, הנוצר בנקודה A על-ידי המטען q_1, הוא

$$U_1 = \frac{kq_1}{r_1} = \frac{9\times10^9 \times 4\times10^{-6}}{0.1} = 3.6\times10^5 \text{ V}$$

הפוטנציאל U_2, הנוצר בנקודה A על-ידי המטען q_2, הוא – לפי משוואה (2-2),

$$U_2 = \frac{kq_2}{r_2} = \frac{9\times10^9 \times \left(-6\times10^{-6}\right)}{0.06} = -9\times10^5 \text{ V}$$

ראינו כי הפוטנציאל בנקודה A, הנוצר על-ידי מערכת של שני מטענים, נתון על-ידי משוואה (2-5):

$$U = U_1 + U_2 = \frac{kq_1}{r_1} + \frac{kq_2}{r_2}$$

נציב את הנתונים, ונקבל:

$$U = U_1 + U_2 = 3.6 \times 10^5 + (-9 \times 10^5) = -5.4 \times 10^5 \text{ V}$$



 **שאלות חזרה** 

שאלה 2-8

המרחק בין שני לוחות מתכת הוא 15 cm. נתון כי בין הלוחות קיים שדה חשמלי אחיד, שגודלו $600\frac{\text{V}}{\text{m}}$. מה הפרש הפוטנציאלים בין לוחות המתכת?

שאלה 2-9

בין קצותיו של תיל, שאורכו 10 m, יש הפרש פוטנציאלים של 220 V. נניח כי השדה החשמלי קבוע לאורך התיל, וכיוונו ככיוון התיל. מה גודל השדה החשמלי?

שאלה 2-10

א. מה הפוטנציאל החשמלי במרחק של 5.3×10^{-11} m מפרוטון בודד? מטען הפרוטון הוא 1.6×10^{-19} C.

ב. מה גודל השדה החשמלי, שיוצר הפרוטון באותו מרחק (מהפרוטון עצמו)?

שאלה 2-11

נתון גוף הטעון מטען חיובי, וסביבו ארבע נקודות (לאו דווקא על קו ישר).

הנקודה A היא הקרובה ביותר אל הגוף הטעון.

הנקודה B היא המרוחקת ביותר מן הגוף הטעון.

הנקודות C ו-D נמצאות במרחק שווה מן הגוף הטעון (במרחק גדול יותר מ-A מהגוף הטעון, ובמרחק קטן יותר מ-D מהגוף הטעון).

א. באיזו נקודה הפוטנציאל הוא הגדול ביותר?

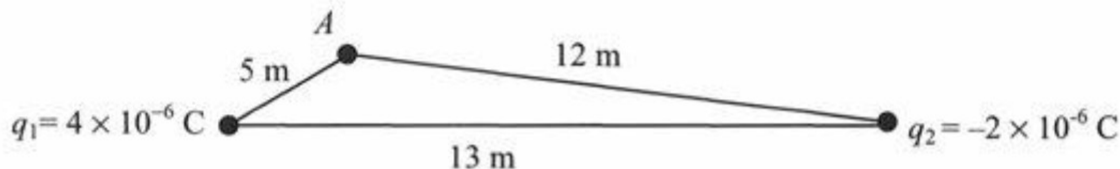
ב. באיזו נקודה הפוטנציאל הוא הקטן ביותר?

ג. לאילו שתי נקודות יש פוטנציאל שווה?

ד. חזור על שני הסעיפים הקודמים, כשנתון כי הגוף טעון מטען שלילי.

שאלה 2-12

באיור שלהלן נתונים שני מטענים. מה הפוטנציאל בנקודה A שבאיור זה?



שאלה 2-13

שלושה מטענים נמצאים על ציר x:

המטען	נמצא בנקודה
$Q_1 = 2 \times 10^{-6}$ C	$x = 20$ cm
$Q_1 = -3 \times 10^{-6}$ C	$x = 30$ cm
$Q_3 = -4 \times 10^{-6}$ C	$x = 40$ cm

חשב את הפוטנציאל בנקודה $x = 0$.

שאלה 2-14

נתונים שני מטענים מנוגדים, $+Q$ ו-$-Q$, המרוחקים זה מזה מרחק r.

א. בטא, באמצעות הנתונים, את הפוטנציאל בנקודה, הנמצאת באמצע הקטע, המחבר את שני המטענים.

ב. בטא, באמצעות הנתונים, את גודל השדה החשמלי באותה נקודה.

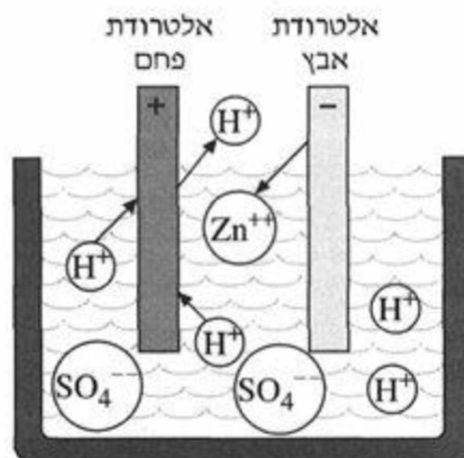
ג. חזור על שני הסעיפים הקודמים, אלא ששני המטענים זהים בסימנם.

שאלה 2-15

האם ייתכן, שהפוטנציאל יהיה שונה מאפס, במקום שבו השדה החשמלי הוא אפס – ולהיפך? נמק.

2.3 התא החשמלי

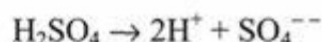
כבר הזכרנו, שאחת הדרכים לקבלת מקור מתח – היא להפריד בין מטענים חיוביים לשליליים. התא החשמלי הוא התקן יעיל להפרדת מטענים. הוא בנוי משני מוטות השקועים בתוך תמיסה, כפי שמתואר באיור 2-10. למוטות אלו קוראים אלקטרודות.



איור 2-10 תא פחם-אבץ

התא החשמלי, המתואר כאן, הוא תא פחם-אבץ. אלקטרודה אחת של התא עשויה פחם, והאלקטרודה השנייה עשויה אבץ. שתי האלקטרודות שקועות בתוך תמיסה של חומצה גופרתית (H_2SO_4). לקצה של אלקטרודה – נהוג לקרוא **הדק**, ולפעמים גם האלקטרודה עצמה נקראת **הדק**.

נסביר עתה כיצד נוצרת הפרדת המטענים בתא החשמלי, וכיצד מצטברים המטענים באלקטרודות של התא. בתוך התמיסה יש תהליך של התפרקות ליונים. מכל מולקולה של החומצה מתקבלים שני יונים חיוביים של מימן (H^+) ויון שלילי אחד (SO_4^{--}) כותבים זאת כך:



$$H_2SO_4 \rightarrow 2H^+ + SO_4^{--}$$

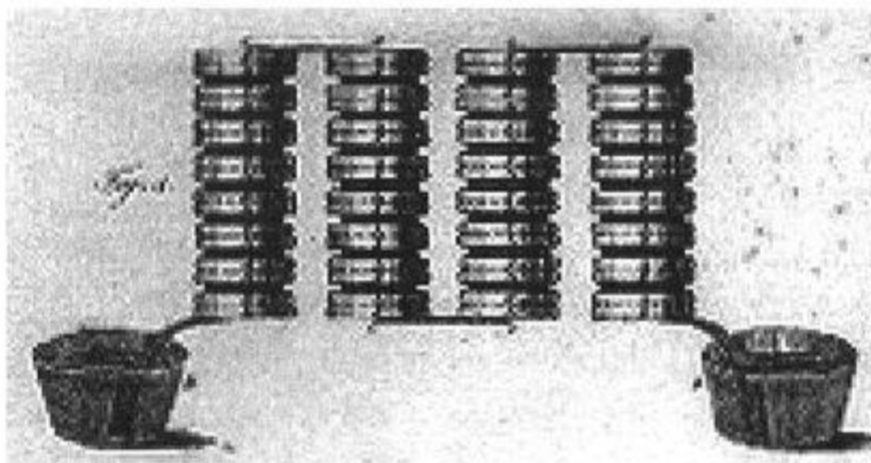
כאשר מכניסים את אלקטרודת האבץ לתוך התמיסה החומצית, יוני האבץ (Z_n^{++}) עוזבים את אלקטרודת האבץ, ועוברים לתמיסה. כל יון Z_n^{++} משאיר אחריו באלקטרודת האבץ שני אלקטרונים עודפים, וכתוצאה מכך – אלקטרודת האבץ נטענת במטען שלילי.

התמיסה, שאליה עוברים יונים חיוביים של אבץ, נטענת במטען חיובי. אבל לתמיסה יש נטייה להישאר אדישה מבחינה חשמלית. לכן, כדי לאזן את כניסתו של כל יון אבץ חיובי, שני יונים של מימן – הנמצאים בתמיסה – מתחברים לשני אלקטרונים מאלקטרודת

הפחם. כך הופכים שני יונים אלה לשני אטומי מימן, העוזבים את התמיסה, ומתחברים – כאמור – לשני אלקטרונים מאלקטרודת הפחם.

מאלקטרודת הפחם נלקחו שני אלקטרונים, והיא הופכת לבעלת מטען חיובי (יש בה חוסר באלקטרונים). ראינו כי באלקטרודת האבץ יש עודף אלקטרונים, כלומר: אלקטרודת האבץ נטענת במטען שלילי, ואלקטרודת הפחם נטענת במטען חיובי. בדרך זו נעשית הפרדת המטענים בתא החשמלי, ומתקבל מתח בין שתי האלקטרודות של התא.

האלקטרודה, שבה מצטבר המטען השלילי, נקראת **האלקטרודה השלילית**, ומסמנים אותה לפעמים ב-"–". האלקטרודה, שבה מצטבר המטען החיובי, נקראת **האלקטרודה החיובית**, ומסמנים אותה לפעמים ב-"+".

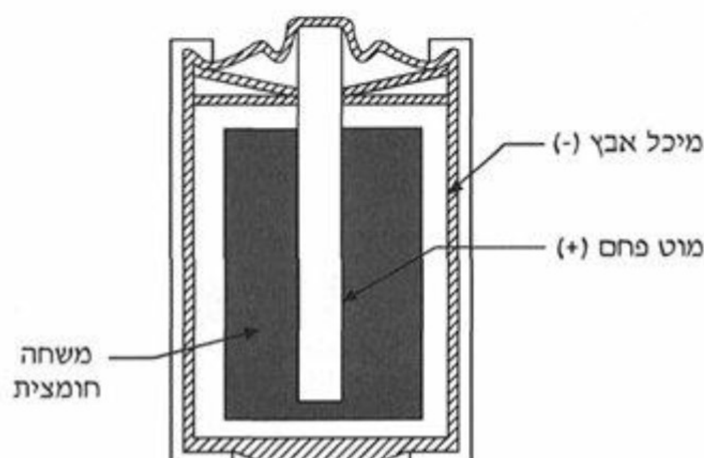


התא החשמלי הראשון שבנה וולטה

סוללות חשמליות

הסברנו כיצד פועל תא חשמלי, המכיל תמיסה נוזלית. לא נהוג להשתמש בתא כזה, ובדרך-כלל משתמשים בתא יבש. תא כזה מכיל משחה חומצית במקום תמיסה נוזלית. מספר תאים יבשים, המחוברים זה לזה, מהווים סוללה. סוללות כאלה אנו מכניסים למצלמה, לפנס, למקלט טרנזיסטורי, או למחשבון.

תא יבש מתואר באיור 2-11. מיכל האבץ מהווה את האלקטרודה השלילית של התא היבש, ומוט הפחם במרכז הוא האלקטרודה החיובית. מוט הפחם מוקף במשחה חומצית.



איור 2-11 תא יבש



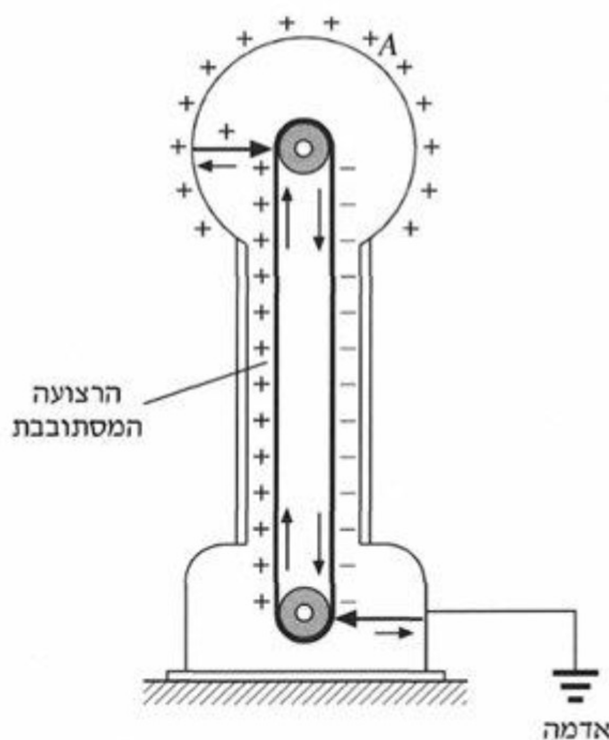
איור 2-12 סוללות חשמליות שונות

סוללות יבשות אחרות, הנפוצות בשוק, הן הסוללות האלקליניות (״אלקליות״). לסוללות אלה יש איכות גבוהה ואורך חיים גדול, ומשתמשים בהן במכשירים אלקטרוניים שונים. הנה ערכים טיפוסיים של מתחי סוללות: 1.5 V, 3 V, 9 V, 12 V.

מחולל ון-דה-גרף

ראינו כי בתאים חשמליים אפשר לקבל מתחים של כמה וולטים. אך יש מכשירים שבאמצעותם אפשר ליצור אפילו מתחים של מיליוני וולטים. אחד המכשירים הללו הוא מחולל ון-דה-גרף.

דגם פשוט של מחולל ון-דה-גרף – מתואר באיור 2-13. בתחתית הרצועה המסתובבת מצטברים מטענים – כתוצאה מהחיכוך בין הרצועה לגלגלת. מטענים אלה נישאים על-גבי הרצועה – עד לכדור המתכתי A, ועוברים אל הכדור. המטענים נאגרים בכדור, וכך מטען הכדור הולך וגדל, ככל שהרצועה ממשיכה להסתובב. בצורה זו ניתן לטעון את הכדור A במטענים גדולים ביותר.



איור 2-13 מחולל ון-דה-גרף

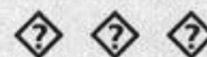
תופעה משעשעת, שאפשר להראות באמצעות מחולל ון-דה-גרף, מתוארת באיור 2-14. באיור זה רואים ילדה, ששערותיה סומרות, כאשר היא נוגעת בכדור של מחולל ון-דה-גרף. הנה הסיבה לתופעה זו: כאשר אדם נוגע בכדור של מחולל ון-דה-גרף, עובר מטען רב לגופו ולשערותיו. כל שערה נטענת במטען מאותו סימן, והשערות דוחות זו את זו.



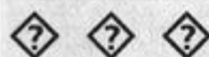
איור 2-14 ילדה נוגעת בכדור של מחולל ון-דה-גרף – ושערותיה סומרות

באמצעות מחוללי ון-דה-גרף, ניתן לקבל מטענים, הגורמים למתחים של 10 מיליון וולט ויותר. משתמשים במתחים אלה, כדי להקנות מהירויות גדולות לחלקיקים טעונים. באמצעות חלקיקים מהירים אלה – "מפצחים" את האטום ולומדים את תכונותיו.

אזהרה! ניסויים בחשמל, הכרוכים במתחים גבוהים, יכולים להיות מסוכנים מאוד, ואסור בשום פנים ואופן לבצע אותם בלי פיקוח מורה או מדריך מוסמך.



שאלות חזרה



שאלה 2-16

תאר שתי דרכים להפרדת מטענים.

שאלה 2-17

"התא החשמלי הוא התקן יעיל להפרדת מטענים."
האם המטענים המופרדים הם שְׁוֵוי-סימן או שׁוֹנֵי-סימן?

בנה במו ידיך תא חשמלי "טבעי"

כל אחד יכול לבנות תא חשמלי במעבדת בית-הספר. לשם כך יספיקו אשכולית ושני מטבעות שונים.
אופן ההכנה: תוקעים באשכולית את שני המטבעות השונים (למשל, מטבע של חצי ש"ח ומטבע של 1 ש"ח), כך שהמטבעות לא יגעו זה בזה.



לוקחים שני תֵיִלִים, ומחברים קצה אחד של כל תיל לאחד המטבעות. את הקצה השני של כל תיל – מחברים לאחד ההדקים של מד זרם רגיש. מד הזרם יַראה, שאכן זורם זרם בתא החשמלי ה"טבעי".

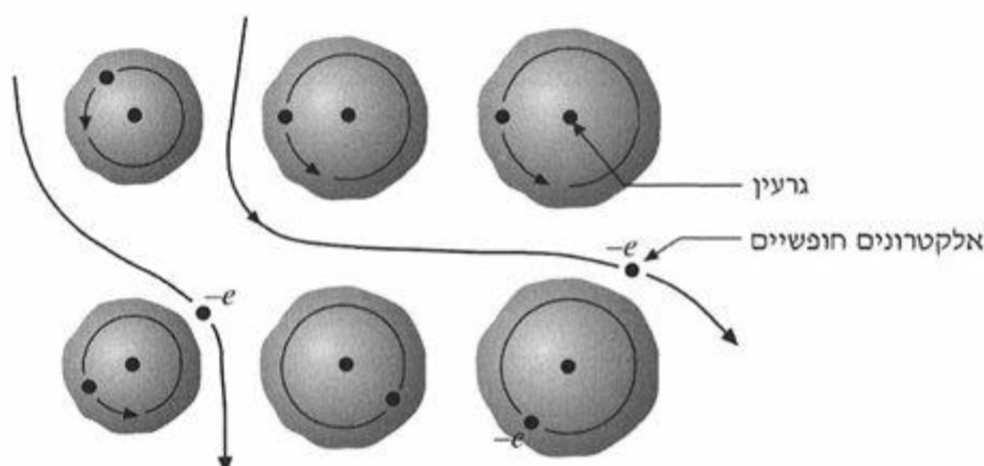
עוד תא חשמלי "טבעי"

קח כוס מיץ לימון ושני מטבעות שונים. טבול את שני המטבעות במיץ, כך שהמטבעות לא יגעו זה בזה, אך יהיו קרובים זה לזה, וחלק מכל מטבע יהיה מחוץ למיץ. דע לך כי בנית תא חשמלי. דרך פשוטה להיווכח בכך, היא לנגוע בלשון בשני המטבעות בבת אחת. בלשון עובר אז זרם חשמלי קטן (ולא מסוכן). בצע את הניסוי.
האם הרגשת משהו בלשונך?

2.4 הזרם החשמלי

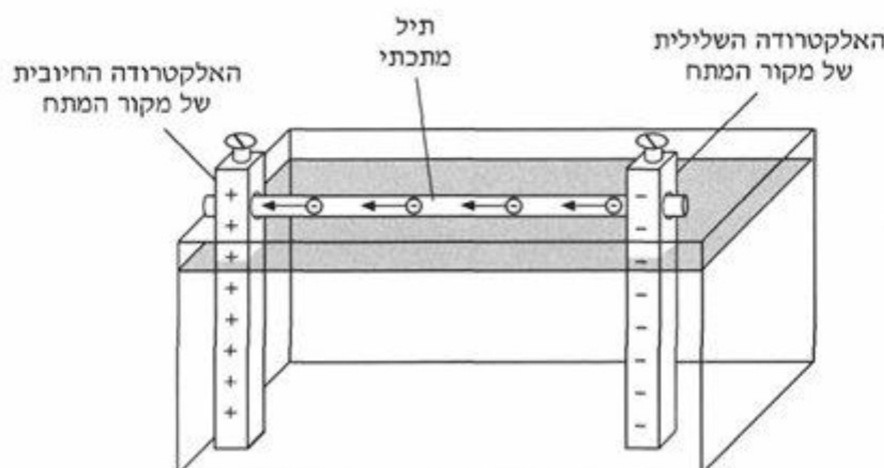
ראינו שבתא החשמלי נעשית הפרדת מטענים. אלקטרודה אחת נטענת במטען חיובי, והשנייה נטענת במטען שלילי. נראה עתה מה יקרה, אם נחבר תיל עשוי מתכת – לשתי האלקטרודות של התא.

כבר בסוף סעיף 2.1 הזכרנו, שבמתכות שונות (כגון: כסף, נחושת ואבץ) יש מצבור של אלקטרונים, החופשיים לנוע. נציין כי לא כל האלקטרונים באטומי המתכת הם אלקטרונים חופשיים. חלק מהאלקטרונים קשורים בחוזקה לגרעיני האטומים, ושאר האלקטרונים חופשיים לנוע בין האטומים במתכת. באיור 2-15 אפשר לראות מסלולים של אלקטרונים חופשיים.



איור 2-15 מסלולים של אלקטרונים חופשיים

ניקח תיל עשוי ממתכת עשירה באלקטרונים חופשיים (למשל, נחושת), ונחבר אותו לשתי האלקטרודות של תא חשמלי (איור 2-16). כאמור, תא חשמלי הוא מקור מתח.



איור 2-16 תיל מחובר לאלקטרודות של מקור מתח. האלקטרונים החופשיים בתיל נעים מהאלקטרודה השלילית – אל האלקטרודה החיובית

אנו יודעים שבין האלקטרודות של התא יש מתח, וכי **מטענים שליליים** נעים **מפוטנציאל נמוך לפוטנציאל גבוה**. לכן **האלקטרונים החופשיים שבתיל המתכתי ינועו מהאלקטרודה השלילית לאלקטרודה החיובית**.

אנו יודעים גם כי באלקטרודה השלילית של התא – מצטברים אלקטרונים עודפים. גם אלקטרונים עודפים אלה יתחילו לנוע לאורך תיל המתכת. תנועה זו של אלקטרונים מן האלקטרודה השלילית, תקטין את המטען השלילי שבאלקטרודה זו. כתוצאה מכך, יתאפשר המשך תהליך הטעינה של האלקטרודות. (שֶׁכֵּן עתה יוכלו יוני האבץ לעזוב את האלקטרודה השלילית, כפי שהסברנו בסעיף 2.2.)

המשך הטעינה של האלקטרודות יגרום להמשך הקיום של המתח בין האלקטרודות. מתח זה ימשיך לגרום לתנועת אלקטרונים מהאלקטרודה השלילית – אל האלקטרודה החיובית של מקור המתח. נסיק מכך כי כאשר מחברים תיל לאלקטרודות אלה, נוצרת בתיל תנועה מכוּוֶנֶת של אלקטרונים מאלקטרודה אחת לשנייה, כלומר, האלקטרונים נעים בתנועה שיש לה כיוון מסוים. תנועה כזאת של אלקטרונים – נקראת **זרם חשמלי**. גם תנועה מכוּוֶנֶת של מטענים חיוביים (כגון, יונים חיוביים), היא זרם חשמלי.

ובאופן כללי:

זרם חשמלי הוא תנועה מכוונת של מטענים חשמליים (חיוביים או שליליים).

אנו נעסוק, בדרך-כלל, ב**תנועה מכוּוֶנֶת של אלקטרונים**.

מוליכים ומבודדים

רוב המתכות - ובהן הנחושת, הכסף והאבץ, שכבר הזכרנו - שייכות לקבוצת חומרים, הנקראים **מוליכים**. התכונה החשובה של המוליכים היא, שנמצאים בהם שפע של חלקיקים נושאי מטען, החופשיים לנוע בחומר. אנו נעסוק בעיקר במוליכים, שבהם החלקיקים האלה הם אלקטרונים. מבחינתנו, מוליך הוא חומר, שניתן ליצור בו בקלות תנועה מכוּוֶנֶת של אלקטרונים.

יש חומרים, שבהם לא ניתן ליצור בקלות תנועה מכוּוֶנֶת של אלקטרונים, בגלל המבנה האטומי של חומרים אלה. חומרים כאלה נקראים **מבודדים** או **מבדדים**. בפרקים הבאים נדון בשימושי מבדדים בחשמל. באיור 2-17 מתוארים מוליכים, המכוסים בחומרים מבודדים.



איור 2-17 מוליכים מכוסים בחומרים מבודדים

שאלות חזרה

שאלה 2-18

האם האלקטרונים, הקשורים בחוזקה לגרעיני האטומים, נקראים אלקטרונים חופשיים?

שאלה 2-19

השלם: תיל מחובר לאלקטרודות של תא חשמלי. האלקטרונים החופשיים בתיל נעים מהאלקטרודה _____ של התא, אל האלקטרודה _____ .

שאלה 2-20

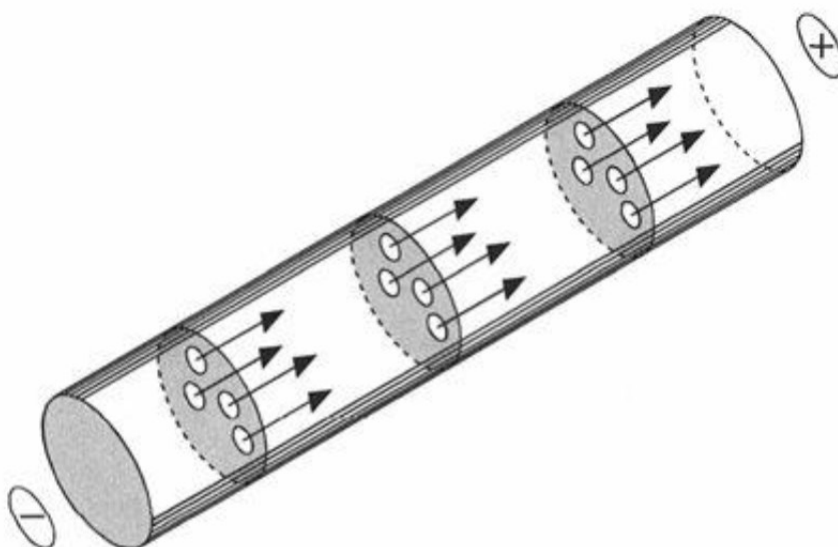
כיצד נקראת תנועה מכוּוֶנֶת של מטענים? סמן את התשובה הנכונה.

א. אלקטרון
ב. הפרש פוטנציאלים
ג. אנרגיה פוטנציאלית חשמלית
ד. זרם חשמלי
ה. מתח חשמלי
ו. פוטנציאל

2.5 חישוב הזרם החשמלי במוליך

הגדרנו את הזרם החשמלי כתנועה מכוּוֶנֶת של מטענים. עתה נגדיר מושג, שבעזרתו נוכל לתאר את גודלו של הזרם החשמלי. מושג זה הוא **עוצמת הזרם החשמלי**. לפעמים מקצרים ואומרים **זרם** במקום **עוצמת זרם**. מסמנים את עוצמת הזרם (ואת הזרם) באות I. באיור 2-18 מתואר זרם במוליך.

עוצמת הזרם החשמלי היא המטען החשמלי העובר ביחידת זמן דרך חתך של המוליך.



איור 2-18 הזרם במוליך, ומטענים עוברים בחתכים שונים של המוליך

נסמן ב-Q את גודל המטען, העובר בחתך המוליך, ונסמן ב-t את משך הזמן שבו עובר המטען. גודל המטען, העובר בחתך המוליך ביחידת זמן, כלומר: הזרם I, נתון על-ידי

$$I = \frac{Q}{t} \qquad (2\text{-}7)$$

I – זרם (או עוצמת הזרם)

Q – מטען

t – זמן

ובמילים:

$$\text{עוצמת הזרם} = \frac{\text{מטען}}{\text{זמן}}$$

למשל, נניח כי במשך זמן של 20 שניות $= t$ עובר מטען של 4 קולון $= Q$ דרך חתך של מוליך. לפי משוואה (2-7), עוצמת הזרם החשמלי I במוליך היא

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{4\ \text{קולון}}{20\ \text{שניות}} = \frac{4\ \text{C}}{20\ \text{s}} = 0.2\frac{\text{C}}{\text{s}}\left[\frac{\text{קולון}}{\text{שניות}}\right]$$

יחידות הזרם

אם מדובר במוליך, שהמטענים החופשיים בו הם אלקטרונים, אפשר לבטא את עוצמת הזרם במוליך – באמצעות מספר האלקטרונים העוברים בחתך המוליך ביחידת זמן. אבל, כפי שכבר אמרנו, בדרך-כלל מודדים את המטען ביחידת המטען קולון.

היחידה של עוצמת הזרם החשמלי היא קולון לשנייה. ליחידה זו קוראים אמפר, ומסמנים אותה באות A.

עוצמת הזרם החשמלי במוליך היא אמפר אחד, אם קולון אחד עובר דרך שטח החתך של המוליך במשך שנייה אחת:

$$\text{(2-8)} \qquad 1\ \text{A} = \frac{1\ \text{C}}{1\ \text{s}} \qquad\qquad \frac{\text{קולון}}{\text{שניות}} = \text{אמפר}$$

אם, למשל, $Q = 0.6\ \text{C}$, $t = 3\ \text{s}$, נקבל כי עוצמת הזרם היא

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{0.6\ \text{C}}{3\ \text{s}} = 0.2\ \text{A}$$

כשהזרם קטן בהרבה מאמפר אחד, נהוג למדוד אותו במילי-אמפר או במיקרו-אמפר. מילי-אמפר הוא אלפית האמפר (כשם שמילימטר הוא אלפית המטר). המילי-אמפר מסומן כך: mA. הקשר בין המילי-אמפר לאמפר הוא

$$\text{(2-9)} \qquad 1\ \text{mA} = \frac{1\ \text{A}}{1{,}000}$$

המיקרו-אמפר הוא מיליונית האמפר. המיקרו-אמפר מסומן כך: μA. הקשר בין המיקרו-אמפר לאמפר הוא

$$1\,\mu\text{A} = \frac{1\,\text{A}}{1{,}000{,}000} \qquad (2\text{-}10)$$

אנדרה מארי אמפר

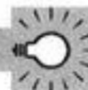
(1836-1775)



יש בדיחות רבות על פרופסורים מפוזרים, אך הפעם אין זו בדיחה, אלא סיפור אמיתי (פחות-או-יותר):

יום אחד יצא אמפר מהכיתה, כשגיר בכיסו. בדרך צץ במוחו רעיון, ואמפר נזקק ללוח לצורך פיתוח הרעיון. אמפר ראה כרכרה שחורה, שחנתה ברחוב, והשתמש בצד האחורי שלה, כאילו היה לוח. לפתע החל הלוח של אמפר להתרחק ממנו (כלומר, הכרכרה החלה לנסוע). אמפר החל ללכת בעקבות הלוח הזז שלו, ולאחר מכן התחיל לרוץ אחרי הלוח, בלי להרגיש אפילו שהוא משעשע את האנשים ברחוב.

כשרונותיו המיוחדים של אמפר נתגלו עוד בצעירותו: בגיל 12 כבר שלט בכל הידע המתימטי של זמנו. בגיל צעיר מאוד נתמנה כפרופסור לפיסיקה ולכימיה. אמפר היה אחד מחוקרי החשמל החשובים ביותר בכל הזמנים. הוא היה הראשון שהסביר כמה מהתופעות הבסיסיות, המקשרות בין חשמל למגנטיות, וגם ניסח כמה מחוקי החשמל. הוא היה הראשון שהצליח למדוד זרם חשמלי. יחידת הזרם **אמפר** נקראת על שמו.



דוגמה 2-4

במשך 5 דקות עבר מטען של 120 קולון דרך החתך של חוט הלהט בנורה. מהי עוצמת הזרם בחוט הלהט במשך הזמן הזה?



פתרון

הזמן נתון בדקות, ותחילה נרשום אותו בשניות:

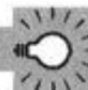
300 שניות = (5 × 60) שניות = 5 דקות

ועכשיו נחשב את עוצמת הזרם, לפי משוואה (2-7):

$$I=\frac{Q}{t}=\frac{120\ C}{300\ s}=0.4\ \text{A}$$

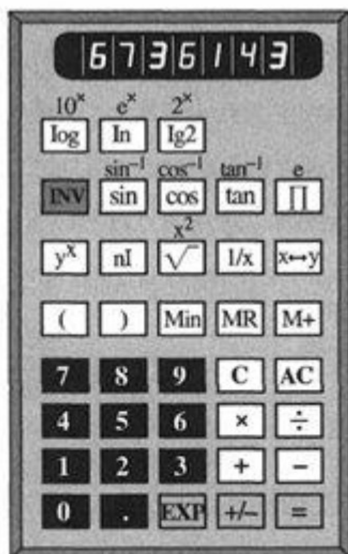
במשך 5 הדקות הנתונות, עוצמת הזרם בחוט הלהט – היא 0.4 A.





דוגמה 2-5

מחשבון פעל במשך שעתיים רצופות. במשך כל הזמן הזה עבר בו זרם של 0.12 mA. מהי כמות המטען, שעברה במחשב במשך זמן זה?



פתרון

נרשום תחילה את הזרם באמפרים :

$$0.12 \text{ mA} = \frac{0.12}{1,000} = 0.00012 \text{ A}$$

נבטא את הזמן בשניות :

$$2 \text{ שעות} = 2 \times 3600 = 7200 \text{ שניות}$$

לפי משוואה (2-7),

$$I = \frac{Q}{t}$$

ולכן

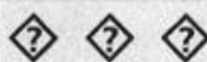
$$Q = It$$

נציב במשוואה זו את ערכי הזרם והזמן :

$$Q = 0.00012 \times 7200 = 0.864 \text{ קולון}$$

כמות המטען, שעברה במחשבון במשך שעתיים רצופות, היא 0.864 קולון.



 שאלות חזרה 

שאלה 2-21

סמן את התשובה הנכונה.

עוצמת הזרם החשמלי במוליך היא ...

א. המטען החשמלי העובר דרך חתך של המוליך, המחובר להדקי תא חשמלי.

ב. המטען החשמלי העובר בין ההדק החיובי להדק השלילי של תא חשמלי.

ג. המטען החשמלי העובר ביחידת זמן דרך חתך של המוליך.

ד. מספר האלקטרונים החופשיים במוליך.

ה. מכפלת המטען במשך הזמן, שהמטען עובר דרך חתך של המוליך.

שאלה 2-22

מטען של 15 קולון עבר במוליך במשך 30 שניות. מהי עוצמת הזרם במוליך?

שאלה 2-23

זרם של 4 A עבר במוליך במשך 20 שניות. חשב את המטען החשמלי, שעבר במוליך במשך זמן זה.

שאלה 2-24

בנורת להט זורם זרם של 0.5 A. תוך כמה זמן יעבור מטען של 6 קולון דרך חתך של חוט הלהט בנורה?

שאלה 2-25

במחשב זורם זרם של 0.8 A. חשב את המטען, שעבר במחשב במשך 4 שעות.

שאלה 2-26

בפנס זורם זרם של 250 mA. תוך כמה זמן יעבור מטען של 3 קולון דרך נורת הפנס?

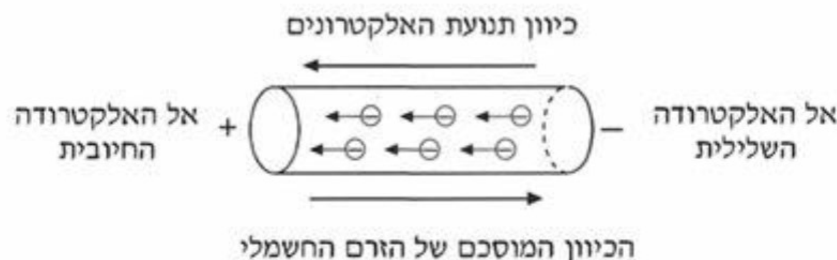
שאלה 2-27

הזרם במקלט טרנזיסטורי (ווקמן) הוא 0.03 A. בטא זרם זה ביחידות mA ו-μA.

2.6 כיוון הזרם החשמלי במוליך

הגדרנו את הזרם החשמלי כתנועה מכוּוֶנֶת של מטענים חשמליים, כלומר: תנועת מטענים שֶׁיֵּש לה כיוון. לכן מייחסים כיוון לזרם. הנטייה הטבעית היא לקבוע את כיוון הזרם ככיוון התנועה של המטענים, שמהם מורכב הזרם. כאמור, אנו נעסוק בעיקר בזרם העובר במוליכים מתכתיים. המטענים החופשיים במוליכים אלה הם אלקטרונים. אם כך, היינו מצפים שכיוון הזרם יהיה ככיוון תנועת האלקטרונים.

ראינו שכיוון תנועת האלקטרונים במוליך מתכתי, המחובר למקור מתח, הוא מהאלקטרודה השלילית של המקור – אל האלקטרודה החיובית שלו. אם כך, היינו מצפים שזה יהיה גם כיוון הזרם. אך כיוון הזרם החשמלי נקבע דווקא מהאלקטרודה החיובית לאלקטרודה השלילית. כיוון זה נקרא **הכיוון המוסכם** של הזרם, והוא מסומן באיור 2-19.



איור 2-19 הכיוון המוסכם של הזרם החשמלי

מדוע נקבע כיוון הזרם כפי שנקבע? פעם (בתקופה של פרנקלין) חשבו שהזרם החשמלי הוא תנועה של מטענים חיוביים, ולכן קבעו את כיוון הזרם החשמלי כפי שקבעו. אף-על-פי שקביעה זו של כיוון הזרם אינה מוצלחת ביותר, היא מקובלת עד היום, וגם אנו נשתמש בה. נסכם:

*האלקטרונים במוליך נעים מהאלקטרודה **השלילית לחיובית**, **והכיוון המוסכם** של הזרם הוא מהאלקטרודה **החיובית לשלילית**.*

שימושים שונים של הזרם החשמלי

ראינו כי ההתקן, הגורם לזרם חשמלי במוליך, הוא מקור מתח. בין האלקטרודות של המקור קיים הפרש פוטנציאלים, הגורם להפעלת כוח על האלקטרונים החופשיים במוליך. כתוצאה מכך, אלקטרונים אלה רוכשים אנרגיה. במהלך התנועה של האלקטרונים, הם יכולים להעביר את האנרגיה החשמלית, שמקורה במקור המתח, לגורמים שונים. אנו רואים אפוא כי קיים קשר בין זרם חשמלי לבין אנרגיה חשמלית.

הנה שתיים מהסיבות הרבות לשימוש הנרחב באנרגיה חשמלית:

א. העברת האנרגיה החשמלית ממקום למקום היא פשוטה, מהירה ויעילה ביותר. לצורך העברת אנרגיה חשמלית, ניתן להסתפק בשני תֵּילִים ממתכת, כגון תילי נחושת, שיעבירו את האנרגיה החשמלית במהירות רבה ובהפסדי אנרגיה קטנים, בהשוואה להפסדי האנרגיה הכרוכים בהעברה של צורות אנרגיה אחרות (חום, למשל). מדוע ניתן להסתפק דווקא בשני תֵּילִים? ניווכח בכך, כשנלמד על מעגלים חשמליים.

ב. לרוב, ההמרה בין אנרגיה חשמלית לצורות אחרות של אנרגיה היא נוחה למדי. למשל, בטלפון (איור 2-20) הופכים תחילה את האנרגיה של גלי הקול לאנרגיה חשמלית, באמצעות מיקרופון. מעבירים אנרגיה זו בכבלים, ולאחר מכן הופכים אותה חזרה לגלי קול, באמצעות אוזניות או רמקול.



איור 2-20 מיקרופון ואוזנייה באחד הדגמים הראשונים של הטלפון

במסגרת לימודינו נדון בהרחבה בחשיבות הזרם החשמלי במערכות טכנולוגיות שונות, וכן נכיר שימושים של האנרגיה החשמלית בחיים המודרניים. כאן נסתפק בדוגמאות אחדות:

– מנוע חשמלי הופך אנרגיה חשמלית לאנרגיה מיכאנית, ויכול להניע גופים גדולים (רכבות, למשל). באיור 2-21 מתוארת רכבת חשמלית.



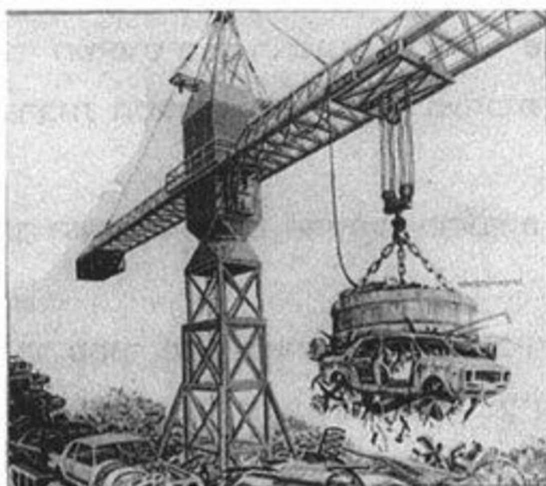
איור 2-21 הרכבת החשמלית (רכבת הקליע) היפנית

– נורה חשמלית הופכת אנרגיה חשמלית לאור.

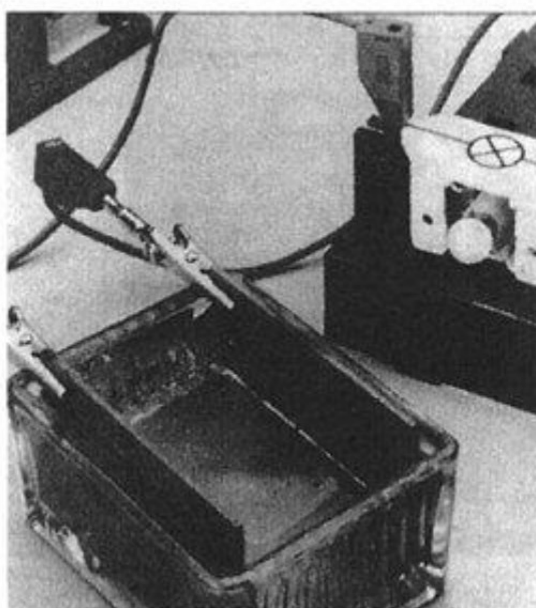
– תנור חשמלי הופך אנרגיה חשמלית לחום.

– באמצעות אלקטרומגנט (התקן חשמלי המתנהג כמגנט, כשזרם חשמלי עובר דרכו). ניתן להרים משאות כבדים, כגון: גרוטאות ברזל. באיור 2-22 מתואר אלקטרומגנט.

– באמצעות אלקטרוליזה (תהליך כימי, שבו זרם חשמלי עובר דרך תמיסה), ניתן לצפות מתכות (איור 2-23), לנקות מתכות על-ידי הפרדת הסיגים מהן, ולהפריד תרכובות.



איור 2-22 הרמת משאות באמצעות אלקטרומגנט



איור 2-23 ציפוי מתכות באמצעות אלקטרוליזה

2.7 צפיפות הזרם

לפעמים נרצה לדעת את צפיפותם של האלקטרונים נושאי הזרם בחתך המוליך, כאשר במוליך זורם זרם. במילים אחרות, נרצה לדעת את צפיפות הזרם במוליך. כאשר ידועה לנו עוצמתו של הזרם החשמלי I, ידועה לנו כמות המטען, שעברה ביחידת זמן דרך חתך של המוליך, אך אין לנו מידע על צפיפות האלקטרונים נושאי הזרם בחתך המוליך. בהגדרת הזרם I אין כלל התייחסות לשטחו של חתך זה.

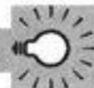
צפיפות הזרם (current density) במוליך היא כמות המטען, העוברת דרך שטח חתך מוליך ביחידת זמן; במילים אחרות: צפיפות הזרם במוליך היא היחס בין עוצמת הזרם I דרך המוליך – לשטח חתכו A. נסמן ב-J את צפיפות הזרם במוליך, ונקבל כי

$$J = \frac{I}{A} \qquad (2\text{-}11)$$

במערכת היחידות SI – השטח A נמדד במטרים רבועים, ועוצמת הזרם I נמדדת באמפרים. היחידה של צפיפות הזרם J תהיה אפוא

$$\frac{\text{A}}{\text{m}^2} \qquad \frac{\text{אמפר}}{\text{מ״ר}} \qquad (2\text{-}12)$$

צפיפות הזרם היא גודל חשוב באלקטרוניקה ובנושאים מתקדמים של חשמל ומגנטיות. צפיפות הזרם היא וקטור, כלומר: גודל עם כיוון. דיון בנושא זה – חורג ממסגרתנו.



דוגמה 2-6

דרך מוליך גלילי, שקוטרו 1 cm, עובר זרם של 2 mA. מה צפיפות הזרם במוליך?

פתרון

קוטר המוליך הוא $D = 1$ cm, ורדיוסו r הוא

$$r = \frac{D}{2} = 0.5 \text{ cm} = 0.005 \text{ m}$$

חתך המוליך הוא עיגול, שקוטרו 1 cm, ורדיוסו 0.5 cm. שטח עיגול, שרדיוסו r, הוא πr^2, ולכן שטח החתך A של המוליך הוא

$$A = \pi r^2 = \pi \times 0.005^2 = 0.0000785 \text{ m}^2 = 0.785 \text{ cm}^2$$

וצפיפות הזרם – לפי משוואה (2-11) – היא

$$J=\frac{I}{A}=\frac{2\times10^{-3}}{0.0000785}=25.5\frac{A}{\text{m}^2}$$

וביחידות $\frac{A}{\text{mm}^2}$:

$$J=\frac{I}{A}=\frac{2\times10^{-3}}{0.785}=25.5\times10^{-4}\,\frac{A}{\text{mm}^2}$$



שאלות חזרה

שאלה 2-28

נתונים שלושה מוליכים גליליים. בכל מוליך עובר זרם של 150 mA .

א. שטח החתך של אחד המוליכים הוא $30\ \text{mm}^2$. חשב את צפיפות הזרם במוליך זה.

ב. רדיוס המוליך השני גדול פי 2 מרדיוס המוליך הראשון. מה צפיפות הזרם במוליך זה?

ג. רדיוס המוליך השלישי קטן פי 4 מרדיוס המוליך הראשון. מה צפיפות הזרם במוליך זה?

שאלה 2-29

בשני מוליכים זורם אותו זרם. האם במוליך העבה יותר – צפיפות הזרם תהיה גדולה יותר, קטנה יותר, או שצפיפות הזרם תהיה שווה בשני המוליכים?

שאלה 2-30

דרך חתך של מוליך עברו 39×10^{18} אלקטרונים במשך 20 שניות. מטען האלקטרון הוא $-1.6\times10^{-19}\,C$.

א. מה עוצמת הזרם במוליך? נא לפרט.

ב. מה צפיפות הזרם, אם ידוע כי שטח החתך של המוליך הוא $10\ \text{mm}^2$?

שאלה 2-31

מטען עובר בפרק-זמן t דרך חתך של מוליך גלילי, שרדיוסו r. הראה כי המטען Q נתון על-ידי $Q=\pi r^2 Jt$ (J – צפיפות הזרם במוליך).

סיכום פרק 2

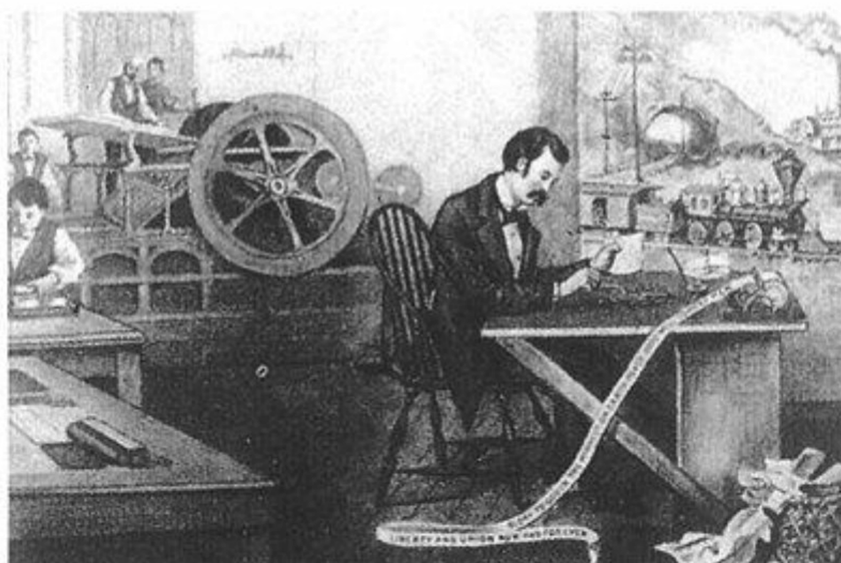
- האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של יחידת מטען בנקודה מסוימת – נקראת **הפוטנציאל** באותה נקודה (אין, למעשה, הבדל בין "אנרגיה של יחידת מטען - לבין "אנרגיה ליחידת מטען").
- הפרש הפוטנציאלים בין שתי נקודות – נקרא מתח. יחידת המתח היא וולט.
- גוף טעון שלילית ינוע , בהשפעת הפרש פוטנציאלים ,ממקום שבו הפוטנציאל נמוך, למקום שבו הפוטנציאל גבוה.
- הפוטנציאל בנקודה, המרוחקת מרחק r ממטען Q, נתון על-ידי $U = k\frac{Q}{r}$.
- הפוטנציאל, הנוצר בנקודה מסוימת על-ידי מערכת מטענים, שווה לסכום הפוטנציאלים הנוצרים בנקודה זו על-ידי המטענים הבודדים (תוך התחשבות בסימני המטענים).
- נתון קטע באורך d. הקשר בין גודל השדה החשמלי האחיד לאורך הקטע – לבין הפרש הפוטנציאלים: $E = \frac{U}{r}$.
- שני מטענים שוני-סימן, המופרדים זה מזה, יכולים לשמש כמקור מתח.
- יש דרכים שונות, שבהן ניתן להפריד בין מטענים חיוביים לשליליים, וליצור על-ידי כך מקורות מתח. התא החשמלי (והסוללה) הוא התקן יעיל להפרדת מטענים.
- תנועה מכוּוֶנֶת של מטענים חשמליים – נקראת זרם חשמלי. האלקטרונים הם נושאי הזרם החשמלי במוליכים מתכתיים. המתכות הן מוליכות, כלומר: ניתן ליצור בהן בקלות זרם חשמלי – וזאת בניגוד למבודדים.
- הזרם החשמלי במוליך נתון על-ידי כמות המטען, העובר דרך שטח החתך של המוליך – ביחידת זמן: $I = \frac{Q}{t}$.
- הכיוון המוסכם של הזרם החשמלי במוליך – מנוגד לכיוון תנועת האלקטרונים באותו מוליך.
- צפיפות הזרם במוליך היא כמות המטען, העוברת דרך שטח חתך מוליך ביחידת זמן; כלומר: צפיפות הזרם במוליך היא היחס בין עוצמת הזרם I דרך המוליך – לשטח חתכו A.

3
התנגדות חשמלית

3.1 מבוא

ראינו שבאמצעות מקור מתח, אפשר ליצור זרם חשמלי לאורך מוליך. משתמשים בכך במערכות רבות ושונות: ברשת החשמל הארצית, במערכת הטלפונים, בתקשורת בין מחשבים, בטלוויזיה בכבלים – ועוד. אחד השימושים הראשונים בזרם, שנוצר במוליך בגלל מקור מתח, היה במערכות הטלגרף הראשונות. מערכות אלו מיועדות לשיגור מברקים.

כיצד השתמשו בזרם החשמלי להעברת מברקים במערכת הטלגרף הראשונה? חיברו מקור מתח למוליך, וכך העבירו זרם לאורך המוליך. כדי להפסיק את הזרם, ניתקו את מקור המתח מהמוליך.



איור 3-1 שיגור אחד המברקים הראשונים בעולם

בוני הטלגרף קבעו סימנים מוסכמים: אם הזרם נמשך זמן קצר (כלומר, מקור המתח היה מחובר למוליך במשך זמן קצר), סימנו נקודה; ואם הזרם נמשך זמן ארוך, סימנו קו. לכל אות ולכל ספרה נקבע צירוף מסוים של קווים ונקודות. כתב זה של קווים ונקודות נקרא – על שם ממציאו – **כתב מורס** (וכן **צופן מורס** או **קוד מורס**). כתב מורס בעברית נתון באיור 3-2.

משגר המברק גרם לזרמים קצרים וארוכים, בהתאם למילים ולספרות שרצה לשגר. מקבל המברק היה מפענח - בעצמו או באמצעות מכשיר - את הזרמים הקצרים והארוכים, ומקבל לבסוף את האותיות והספרות המתאימות.

ממציאי הטלגרף העבירו תֵילים מוליכים בין תחנות רכבת שונות, וקיוו שבאמצעות הטלגרף יוכלו ליצור קשר מברקים מהיר בין התחנות. אבל לאכזבתם גילו, שכאשר המרחק בין התחנות היה גדול, לא היה זרם במערכת הטלגרף, ולכן לא יכלו לשלוח מברקים למרחקים ארוכים.

ספרות	אותיות			סימני פיסוק	
1 .----	א -.	ח	ס .-.-.	נקודה	.-.-.-
2 ..---	ב ...-	ט -..	ע -.-.	פסיק	--..--
3 ...--	ג .---	י ..	פ .--.	סימן שאלה	..-.-..
4 ....-	ד ..-	כ -.-	צ --.		
5	ה ---	ל ..-.	ק -.--		
6 -....	ו .	מ --	ר .-.		
7 --...	ז ..--	נ .-	ש ...		
8 ---..			ת -		
9 ----.					
0 -----					

איור 3-2 כתב מורס בעברית

היה ברור שה"אשם" היה המוליך הארוך. המסקנה הייתה שמוליכים מגלים התנגדות לזרם הזורם דרכם; וככל שהמוליך ארוך יותר, ההתנגדות שלו גדולה יותר, והזרם קטן יותר.

זמן קצר לאחר המצאת הטלגרף, נמצא פתרון טכני לבעיית השיגור של מברקים למרחקים גדולים, בעזרתו של פיזיקאי אנגלי בשם ויטסטון. ויטסטון הבין שעל-ידי שימוש במתח

גבוה יותר, אפשר לשלוח את המברקים למרחקים ארוכים יותר. אך במשך זמן רב לא הבינו החוקרים – מדוע מוליכים מגלים התנגדות לזרם העובר דרכם.

רק לאחר שהחוקרים למדו עוד על מבנה החומר, הצליחו להבין את הסיבה לתופעת ההתנגדות. הם גילו, שהאלקטרונים החופשיים, הנעים במוליך, מתנגשים ביונים של המוליך. בגלל ההתנגשויות, קטנה – למעשה – מהירות האלקטרונים; פחות אלקטרונים עוברים דרך חתך המוליך ביחידת זמן, כלומר: נוצרת התנגדות לזרם במוליך.

צ׳ארלס ויטסטון (1802-1875)



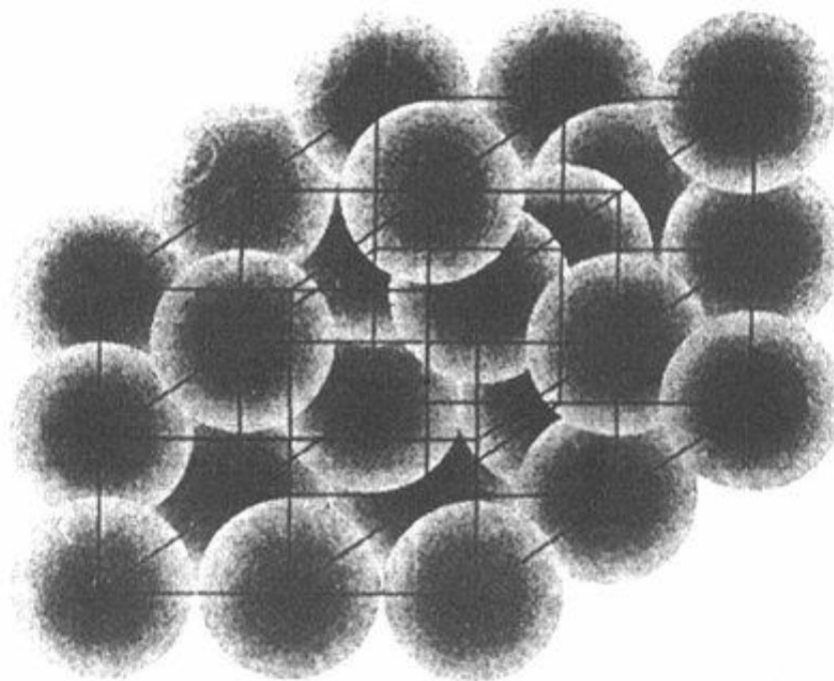
צ׳ארלס ויטסטון עזר בפיתוח אחד הטלגרפים המעשיים הראשונים (בשנת 1833 בערך), אך הוא זכור כיום בעיקר בזכות מכשיר שהמציא למדידה מדויקת של התנגדות. המכשיר נקרא **גשר ויטסטון**.

אף-על-פי שחבריו המדענים העריצו אותו, הוא היה ביישן מאוד, וסבל מְפַּחַד קהל. מְסַפְּרִים כי בשנת 1846 היה צריך להרצות במכון המלכותי הבריטי, אך כמה דקות לפני תחילת ההרצאה, נתקף פחד מפני הקהל - וברח.

גם כיום מתקיימות באותו מכון הרצאות בפני הקהל הרחב. אך מאז אותו יום בשנת 1846, נועלים את המרצים בחדר קטן – כחצי שעה לפני הרצאתם, כדי שלא יברחו לפני ההרצאה.

3.2 התנגדות מוליכים למעבר זרם חשמלי דרכם

כדי להבין מדוע מוליכים מגלים התנגדות למעבר זרם דרכם, נצטרך לחזור ולהתבונן במבנה האטומי של החומרים המוליכים. אנו נעסוק בעיקר במוליכים עשויים מתכת, ולכן נתבונן במבנה האטומי של המתכות. האטומים במתכות מסודרים בצורה סימטרית, שכבות שכבות של אטומים, ובכל שכבה יש אטומים המסודרים בצורה מסוימת וקבועה. מבנה כזה נקרא **סורג** או **סריג**. באיור 3-3 נתון סורג מתכתי.



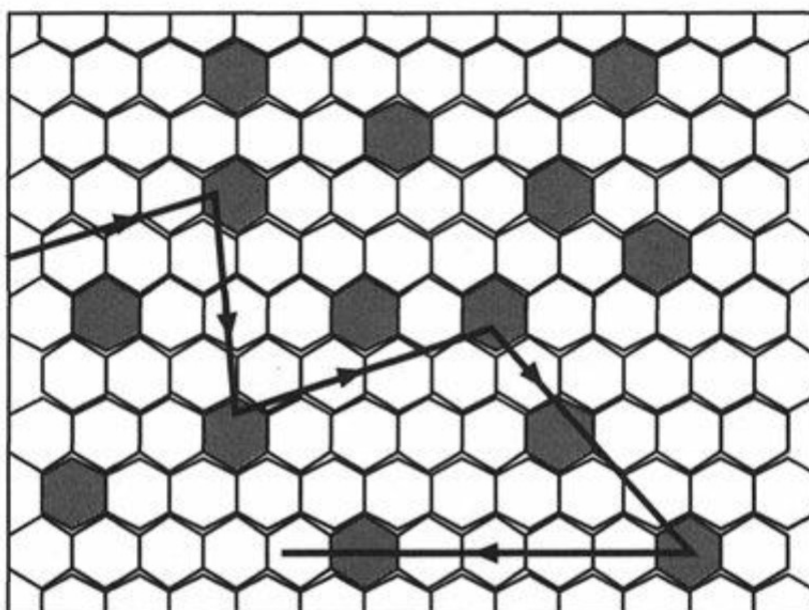
איור 3-3 סורג מתכתי

למדנו כבר שחלק מהאלקטרונים של אטומי המתכת הם אלקטרונים חופשיים. אלקטרונים אלה אינם קשורים לאטומים שלהם, אלא יכולים לנוע בסורג כולו. האטומים, שהאלקטרונים החופשיים עזבו אותם, הופכים ליונים חיוביים, והאלקטרונים החופשיים נעים כל הזמן בכל הכיוונים בתוך הסורג המתכתי.

התיאור, שהבאנו עד עכשיו מתאים למוליכים מתכתיים אידיאליים. כלומר, מוליכים המורכבים מסורגים, שבהם כל יון קבוע במקומו, וכל היונים זהים זה לזה. אבל במוליך מתכתי מעשי – המבנה המושלם של הסורג אינו נשמר. היונים החיוביים אינם נעים

ממקום למקום, אבל הם מתנודדים בתנודות זעירות. נוסף לכך, נכנסים לסורג יונים זרים, שגם הם מקלקלים את המבנה המושלם של הסורג.

כאשר האלקטרונים החופשיים נעים בתוך סורג לא-מושלם, הם מתנגשים ביונים, כיוון תנועתם משתנה, ומהירותם קטנה. באיור 3-4 רואים מסלולים של אלקטרונים בתוך סורג מתכתי מעשי. גם בסורג האידיאלי וגם בסורג המעשי – אין כיוון אחד שבו נעים יותר אלקטרונים מאשר בכיוונים האחרים.



איור 3-4 מסלולי תנועה של אלקטרונים חופשיים בסורג לא מושלם

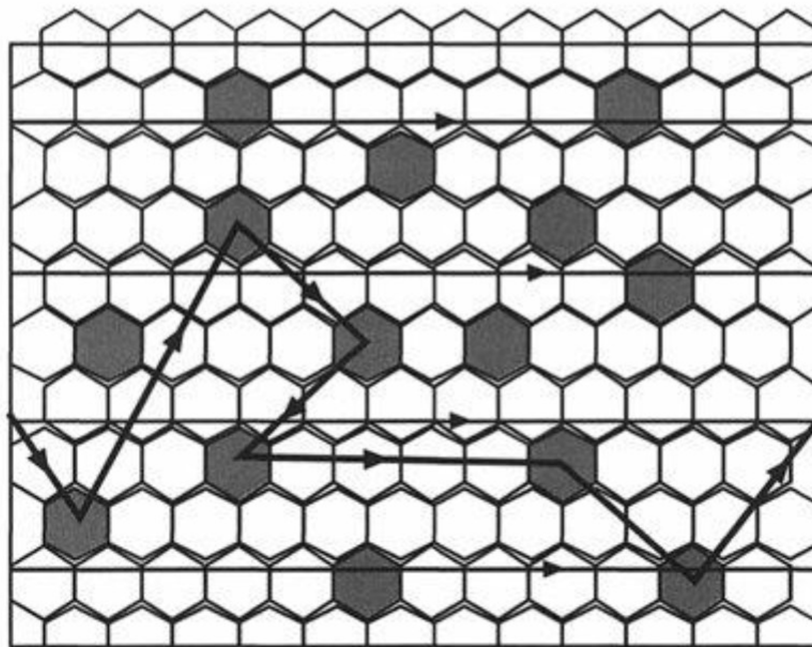
כזכור, הגדרנו את הזרם החשמלי כתנועת אלקטרונים בכיוון מסוים. מאחר שהאלקטרונים החופשיים בסורג אינם נעים לשום כיוון מיוחד, לא נוצר בסורג זרם חשמלי.

עכשיו נראה מה קורה, כאשר מחברים מוליך מתכתי – להדקים של מקור מתח. אנו יודעים שמקור המתח גורם לתנועה מכוּוֶנֶת של אלקטרונים בתוך המוליך, מההדק השלילי של מקור המתח – אל ההדק החיובי שלו.

אבל גם כאשר האלקטרונים החופשיים נעים בתוך המוליך בתנועה מכוּוֶנֶת, יש התנגשויות בין האלקטרונים לבין היונים בסורג המתכתי. גם בתנועה המכוּוֶנֶת – התנגשויות אלו גורמות לשינויים בכיוון התנועה של האלקטרונים ולהקטנת מהירותם. באיור 3-5

מתוארים – באמצעות חִצים – מסלולי תנועה של האלקטרונים החופשיים, כשמקור מתח מחובר בין קצות המוליך.

אם-כן, התנועה המכוּוֶנֶת של האלקטרונים החופשיים – מתעכבת בגלל ההתנגשויות, ובמוליך נוצרת התנגדות לזרם החשמלי, ובקיצור : **התנגדות**.





איור 5-3 מסלולי תנועה של האלקטרונים החופשיים, כשמקור מתח מחובר בין קצות המוליך

שאלות חזרה

שאלה 3-1

"במערכת הטלגרף הראשונה לא ניתן היה להעביר מברקים למרחק גדול." מה הייתה הסיבה לכך? (סמן את התשובה הנכונה.)

א. אי אפשר להבדיל בין זרם הנמשך זמן ארוך, לבין זרם הנמשך זמן קצר.

ב. ככל שמוליך ארוך יותר, התנגדותו לזרם הזורם דרכו – גדולה יותר.

ג. ככל שמוליך ארוך יותר, התנגדותו לזרם הזורם דרכו – קטנה יותר.

ד. במוליך לא יכול לזרום זרם.

שאלה 3-2

מה גורם להתנגדות לזרם במוליך?

א. ההתנגשויות בין האלקטרונים החופשיים, הנעים במוליך, לבין היונים במוליך.

ב. האלקטרונים במוליך, הנמצאים בגרעין האטום.

ג. המטענים שוֹנֵי-הסימן באלקטרודות של מקור המתח.

שאלה 3-3

הסבר בשתיים-שלוש שורות – מדוע למוליך יש התנגדות. השתמש במושגים הבאים: סורג לא מושלם, אלקטרונים חופשיים, יונים.

3.3 הגדרת ההתנגדות באמצעות מתח וזרם

ראינו כי יש קשר הדוק בין התנגדות המוליך לבין הזרם דרך המוליך. נפרט זאת: אם מחברים למקור מתח נתון – מוליך שֶׁיֵּשׁ לו התנגדות קטנה מאוד, כי אז הכוח החשמלי הפועל על המטענים – בגלל מקור המתח – גורם לזרם גדול מאוד במוליך; ואם מחברים לאותו מקור מתח – מוליך שֶׁיֵּשׁ לו התנגדות גדולה מאוד, לא עובר כמעט זרם במוליך.

ובאופן כללי: כאשר מחברים מוליכים שונים למקור מתח נתון, רואים כי ככל שהתנגדות המוליך גדולה יותר, הזרם במוליך קטן יותר, ולהיפך.

אם-כן, נוכל להגדיר את התנגדות המוליך בעזרת הקשר בין המתח על המוליך – לבין הזרם במוליך. נניח שמחברים מוליך למקור מתח. נסמן באות U את המתח בין קצות המוליך, ונסמן באות I את הזרם, הזורם במוליך בגלל המתח U. נגדיר:

התנגדות המוליך היא היחס בין המתח U לזרם I.

נסמן את ההתנגדות באות R, ונוכל לרשום זאת כך:

$$R = \frac{U}{I} \qquad (3\text{-}1)$$

R – התנגדות

U – מתח

I – זרם

נראה כיצד משתמשים במשוואה זו. נניח כי בין קצות מוליך, העשוי נחושת, יש מתח של 12 V, והזרם במוליך זה הוא 10 A . התנגדות המוליך היא – לפי משוואה (3-1),

$$R = \frac{U}{I} = \frac{12\ \text{V}}{10\ \text{A}} = 1.2 \frac{\text{V}}{\text{A}}$$

יחידת ההתנגדות

אנו רואים כי יחידת ההתנגדות היא וולט חלקי אמפר. ליחידה זו קוראים אום, ומסמנים אותה באות היוונית Ω (אומגה גדולה). כלומר,

$$\text{אום} = \frac{\text{וולט}}{\text{אמפר}}$$

או

$$1\,\Omega = \frac{1\,\text{V}}{1\,\text{A}} \qquad (3\text{-}2)$$

ולכן בדוגמה שהבאנו, התנגדות מוליך הנחושת היא 1.2 אום, או 1.2 Ω .

נגדיר אם-כן את יחידת ההתנגדות אום בצורה הבאה:

למוליך יש התנגדות של אום אחד (1 Ω), אם הפרש פוטנציאלים של וולט אחד (1 V) בין קצותיו, יוצר במוליך זרם של אמפר אחד (1 A).

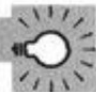
גיאורג סימון אום (1787-1851 בערך)



"תוצאות מחקרו התקבלו תחילה בספקנות, ואפילו בלעג, על-ידי מדענים אחרים, ורק אחרי שנים הכירו בחשיבות תגליתו".

תיאור זה מתאים למדענים רבים. אחד מהם הוא הפיזיקאי הגרמני גיאורג סימון אום. הוא היה בן למשפחה מרובת ילדים. את השכלתו הבסיסית רכש מאביו, שהיה מסגר והתעניין במדע.

אום גילה את החוק, שנקרא אחר-כך על שמו: חוק אום. החוק התקבל בהתחלה בביקורת שלילית ואפילו בלעג. אום נפגע מאוד מהיחס אליו, והתפטר מהאוניברסיטה שלימד בה. רק לאחר זמן הכירו בחשיבות תגליתו והוא זכה בכבוד גדול.



דוגמה 3-1

נתונים שני מוליכים, האחד עשוי ברזל והשני עשוי נחושת. בטבלה רשומים המתח בין קצות כל מוליך והזרם בכל מוליך. לאיזה משני המוליכים יש התנגדות קטנה יותר?

המוליך	המתח בין קצות המוליך	הזרם במוליך
ברזל	12 V	5 A
נחושת	24 V	6 A

פתרון

ההתנגדות R_1 של המוליך העשוי ברזל היא

$$R_1 = \frac{12\ \text{V}}{5\ \text{A}} = 2.4\ \Omega$$

ההתנגדות R_2 של המוליך העשוי נחושת היא

$$R_2 = \frac{24\ \text{V}}{6\ \text{A}} = 4\ \Omega$$

בדוגמה זו – התנגדות מוליך הנחושת קטנה מהתנגדות מוליך הברזל.



כאשר ההתנגדות גדולה, נהוג למדוד אותה בקילוֹ-אוֹם או במֶגָה-אוֹם.

קילו-אום $(\text{k}\Omega)$ = אלף אום:

$$1\ \text{k}\Omega = 1{,}000\ \Omega = 10^3\ \Omega$$

מגה-אום $(\text{M}\Omega)$ = מיליון אום:

$$1\ \text{M}\Omega = 1{,}000{,}000\ \Omega = 10^6\ \Omega$$

שאלות חזרה

שאלה 3-4

נתונים שלושה מוליכים שונים. מחברים כל פעם מוליך אחר לאותו מקור מתח. למוליך הראשון התנגדות קטנה, למוליך השני התנגדות בינונית, ולמוליך השלישי התנגדות גדולה. באיזה מהמוליכים יזרום הזרם הגדול ביותר? נמק.

שאלה 3-5

מוליך מחובר למקור מתח. בין קצות המוליך יש מתח, ובמוליך זורם זרם. כיצד מוגדרת התנגדות המוליך? (סמן את התשובה הנכונה.)

א. היחס בין הזרם למתח

ב. היחס בין המתח לזרם

ג. מכפלת המתח בזרם

ד. סכום המתח והזרם

שאלה 3-6

המתח בין קצות חוט הלהט בפנס הוא 3 V, והזרם בחוט הוא 0.3 A. מהי התנגדות חוט הלהט?

שאלה 3-7

סמן את המשוואה הנכונה.

א. $R=\frac{U}{I}$

ב. $R=\frac{I}{U}$

ג. $R=UI$

ד. $R=\frac{1}{UI}$

3.4 הגורמים הקובעים את גודל ההתנגדות של מוליך

למדנו כי למוליך יש התנגדות, ובעזרת המשוואה $R=\frac{U}{I}$ אנו יכולים לדעת גם את גודל ההתנגדות של מוליך. לשם כך עלינו לחבר את המוליך למקור מתח U. אם נדע את עוצמת הזרם I, הזורם במוליך בגלל המתח U, נוכל לדעת את התנגדות המוליך. אבל עדיין איננו יודעים אילו תכונות של המוליך קובעות את התנגדות המוליך.

שלוש התכונות העיקריות, הקובעות את ההתנגדות של מוליך, הן:

- אורך המוליך (האורך מסומן באות ℓ)
- שטח החתך של המוליך (שטח החתך מסומן באות A)
- החומר שממנו עשוי המוליך

נדון בכל אחת מהתכונות האלה ובהשפעתן על התנגדות המוליך.

השפעת אורך המוליך על התנגדותו

נתונים כמה מוליכים, העשויים מאותו חומר ושטחי החתך שלהם שווים, אך הם נבדלים זה מזה באורכם (איור 3-6). במקרה זה, ככל שהמוליך ארוך יותר, התנגדותו גדולה יותר.



איור 3-6 מוליכים הנבדלים באורכם

נסביר זאת: ככל שהמוליך ארוך יותר, האלקטרונים במוליך עוברים דרך ארוכה יותר – מקצה אחד של המוליך לקצה השני. ככל שהאלקטרונים עוברים מרחק גדול יותר, הם מתנגשים ביונים רבים יותר בתוך הסורג המתכתי הלא-מושלם. כתוצאה מכך, התנועה

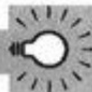
המכוּוָנֶת של האלקטרונים מתעכבת, ולכן פחות אלקטרונים עוברים ביחידת זמן דרך שטח החתך של המוליך. פירוש הדבר שהזרם קטן יותר, וכפי שכבר אמרנו, זהו סימן לכך שההתנגדות גדולה יותר.

לכן,

ככל שהמוליך ארוך יותר, ההתנגדות שלו גדולה יותר.

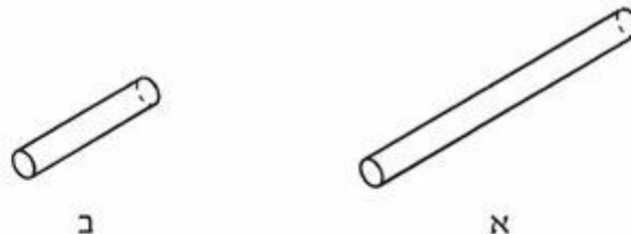
עכשיו אנו יכולים להבין מדוע לא הצליחו מערכות הטלגרף הראשונות להעביר מברקים למרחקים גדולים. ככל שהגדילו את המרחק בין משגר המברק לבין מפענח המברק, היו צריכים למתוח תַּילים מוליכים ארוכים יותר, ולכן גם התנגדות התַּילים הלכה וגדלה. כתוצאה מכך, הזרם נעשה קטן יותר, עד שלמעשה לא היה כלל זרם במוליכים.

כדי לבדוק מהו הקשר המדויק בין אורך מוליך לבין התנגדותו, נערכו ניסויים שבהם חיברו למקור מתח מסוים – מוליכים שנבדלו זה מזה רק באורכם. בניסויים אלה מדדו את הזרם שעבר בכל מוליך, ועל סמך המדידות חישבו את ההתנגדות של כל מוליך. כמו כן מדדו את האורך של כל מוליך. מצאו כי **ההתנגדות של מוליך נמצאת ביחס ישר לאורך המוליך**. למשל: אם מגדילים פי 2 את אורך המוליך, גם ההתנגדות שלו גדלה פי 2.



דוגמה 3-2

באיור 3-7 נתונים שני מוליכים הנבדלים זה מזה רק באורך: אורך מוליך א הוא $\ell_1 =$ 4 מטר, ואורך מוליך ב הוא $\ell_2 =$ 2 מטר. נתון כי התנגדות המוליך הקצר היא $R_2 = 5\ \Omega$. מהי ההתנגדות R_1 של המוליך הארוך?



איור 3-7

פתרון

אורך מוליך א גדול פי 2 מאורך מוליך ב, כי

$$\frac{\ell_1}{\ell_2} = \frac{\text{אורך מוליך א}}{\text{אורך מוליך ב}} = \frac{4\text{ מ'}}{2\text{ מ'}} = 2$$

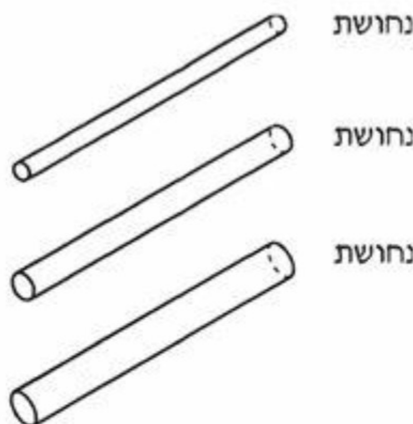
ההתנגדות נמצאת ביחס ישר לאורך, ולכן יחס ההתנגדויות הוא כיחס האורכים; כלומר, $\frac{\ell_1}{\ell_2} = \frac{R_1}{R_2}$. אם אורך מוליך א גדול פי 2 מאורך מוליך ב, גם ההתנגדות של מוליך א גדולה פי 2 מההתנגדות של מוליך ב, כלומר, $\frac{R_1}{R_2} = 2$. ההתנגדות של מוליך ב (המוליך הקצר) היא $5\ \Omega$, ולכן ההתנגדות של מוליך א היא

$$R_1 = 2R_2 = 2 \times 5 = 10\ \Omega$$



השפעת שטח החתך של המוליך על התנגדותו

נתונים כמה מוליכים, העשויים מאותו חומר והשווים באורכם, אך נבדלים זה מזה בשטח החתך שלהם (איור 8-3). במקרה זה, ככל ששטח החתך גדול יותר, התנגדות המוליך קטנה יותר.



איור 8-3 מוליכים הנבדלים זה מזה רק בשטח החתך

נסביר זאת: ככל ששטח החתך של מוליך גדול יותר, יש בשטח החתך שלו יותר אלקטרונים חופשיים. לכן, כאשר מחברים את המוליך למקור מתח, יותר אלקטרונים חופשיים נדחפים על-ידי המקור – דרך שטח החתך – בכל יחידת זמן. במילים אחרות: הזרם במוליך גדול

יותר. העובדה שהזרם במוליך גדול יותר (כשנתון כי אין שינוי במתח המקור), פירושה שהמוליך מתנגד פחות למעבר זרם דרכו. כלומר: התנגדות המוליך קטנה יותר.

לכן,

ככל ששטח החתך של המוליך גדול יותר, ההתנגדות שלו קטנה יותר.

כמו שמצאו בניסויים את הקשר בין אורך המוליך להתנגדותו, מצאו גם את הקשר בין שטח החתך של מוליך להתנגדותו. לשם כך חיברו למקור מתח מסוים מוליכים שונים, שנבדלו זה מזה רק בשטח החתך שלהם. מדדו את הזרם בכל מוליך, וחישבו את התנגדותו. בניסויים אלה מצאו כי **ההתנגדות של מוליך נמצאת ביחס הפוך לשטח החתך של המוליך**. למשל: אם מגדילים פי 2 את שטח החתך של מוליך, התנגדותו קטנה פי 2.



דוגמה 3-2

נתונים שני מוליכים העשויים מאותו חומר, והשווים באורכם. ההתנגדות של מוליך א היא $8\ \Omega$ ושטח החתך שלו גדול פי 4 משטח החתך של מוליך ב.
מהי ההתנגדות של מוליך ב?

פתרון

ההתנגדות נמצאת ביחס הפוך לשטח החתך. בדוגמה שלנו, **שטח החתך של מוליך א גדול פי 4 משטח החתך של מוליך ב, ולכן התנגדות מוליך א קטנה פי 4 מהתנגדות מוליך ב**. במילים אחרות: התנגדות מוליך ב גדולה פי 4 מהתנגדות מוליך א.

התנגדות מוליך א היא $8\ \Omega$, ולכן ההתנגדות של מוליך ב היא

$$8\ \Omega \times 4 = 32\ \Omega$$



התנגדות סגולית – והשפעת החומר, שממנו עשוי המוליך, על התנגדותו

ראינו שההתנגדות של מוליך תלויה באורך שלו ובשטח החתך שלו. אבל לשני מוליכים, שיש להם אותו אורך ואותו שטח חתך, יכולה להיות התנגדות שונה, אם הם עשויים מחומרים שונים. אנו יודעים שיש תַּילים מוליכים העשויים ממתכות שונות. יש תֵּילים עשויים נחושת, יש תֵּילים מברזל, מאלומיניום ועוד.

לכל אחת מהמתכות – שהזכרנו כאן – יש תכונות משלה, ויש הבדלים אחדים בין המתכות האלה. נזכיר כאן כמה הבדלים המשפיעים על התנגדות התַילים. הבדל אחד הוא במספר האלקטרונים החופשיים בסורג. הבדל אחר הוא במבנה הסורג.

אם-כן, לכל מוליך יש תכונות מיוחדות משלו, ובמילים אחרות: לכל מוליך יש **סגולות** משלו. סגולות אלה אינן תלויות באורך ובשטח החתך של המוליך (ובקיצור: סגולות אלה אינן תלויות בממדי המוליך).

כתוצאה מהסגולות של המוליכים המתכתיים השונים, יש לכל אחד מהם התנגדות שונה, גם אם למוליכים יש אותו אורך ואותו שטח חתך. כדי להיווכח בכך, מודדים את ההתנגדות של מוליכים, העשויים מחומרים שונים, שלכולם אותו אורך ואותו שטח חתך. המדידות מגלות שההתנגדויות של המוליכים אכן שונות זו מזו.

כדי להקל את המדידות וההשוואות, בוחרים מוליכים שהאורך שלהם הוא יחידת אורך אחת (למשל: מטר אחד), ושטח החתך שלהם הוא יחידת שטח אחת (למשל: מילימטר רבוע אחד). ההתנגדות, הנמדדת בתנאים אלה, נקראת **התנגדות סגולית**, והיא מסומנת באות היוונית ρ (רוֹ). לכל חומר יש התנגדות סגולית משלו.

במדידות רבות שנעשו, התגלה כי **ההתנגדות של מוליך נמצאת ביחס ישר להתנגדות הסגולית של החומר שממנו עשוי המוליך**.

לסיכום: מצאנו כי שלוש תכונות משפיעות על גודל ההתנגדות של מוליך: אורך המוליך; שטח החתך שלו; והחומר שממנו עשוי המוליך. נכתוב בצורת משוואה את הקשר בין ההתנגדות של מוליך לבין התכונות הללו של המוליך:

$$\text{התנגדות} = \frac{\text{אורך} \times \text{התנגדות סגולית}}{\text{שטח החתך}}$$

כלומר:

התנגדות המוליך נמצאת ביחס ישר להתנגדות הסגולית של החומר שממנו עשוי המוליך ולאורך המוליך, וביחס הפוך לשטח החתך של המוליך.

נסמן באותיות את הגדלים המופיעים במשוואה:

התנגדות – R

אורך – ℓ

שטח חתך – A

התנגדות סגולית – ρ

ונקבל את המשוואה:

$$R = \frac{\rho \ell}{A} \qquad (3\text{-}3)$$

על-פי משוואה זו נוכל למצוא את ההתנגדות הסגולית ρ של החומר שממנו עשוי מוליך, אם נדע את התנגדות המוליך R, את אורך המוליך L ואת שטח החתך שלו A:

$$\rho = \frac{RA}{\ell} \qquad (3\text{-}4)$$

יחידות ההתנגדות הסגולית

בשלב זה איננו יודעים עדיין מהי יחידת ההתנגדות הסגולית. אבל אנו יודעים את היחידות של שלושת הגדלים האחרים, המופיעים במשוואה (3-4) המבטאת את ההתנגדות הסגולית: האורך, שטח החתך וההתנגדות. בעזרת היחידות של הגדלים האלה, נוכל לבטא את יחידות ההתנגדות הסגולית. נדגים זאת.

נניח כי אורך מוליך נחושת הוא 400 מטרים (כלומר, $\ell = 400$ m) שטח החתך של המוליך הוא 8 מילימטרים רבועים (כלומר, $A = 8$ mm^2), והתנגדות המוליך היא 0.9 Ω (כלומר, $R = 0.9\ \Omega$). ההתנגדות הסגולית ρ של הנחושת היא, לפי משוואה (3-4),

$$\rho = \frac{RA}{\ell} = \frac{0.9 \times 8}{400} = 0.018$$

ויחידות ההתנגדות הסגולית מתקבלות על-ידי כך, שמחלקים את מכפלת היחידות שבמונה ביחידות של המכנה במשוואה $\rho = \frac{RA}{\ell}$, ומקבלים:

$$\rho = \frac{RA}{\ell} = \frac{0.9\ \Omega \times 8\ \text{mm}^2}{400\ \text{m}} = 0.018 \frac{\Omega \times \text{mm}^2}{\text{m}}$$

ולכן יחידת ההתנגדות הסגולית היא

$$\frac{\Omega \times \text{mm}^2}{\text{m}}$$

כלומר:

$$\frac{\text{אום} \times \text{מילימטר רבוע}}{\text{מטר}}$$

יש יחידות נוספות של התנגדות סגולית, ובספר זה נשתמש ביחידות אלה. אם מבטאים את האורך במטרים, ואת שטח החתך של המוליך – במטרים רבועים, יחידת ההתנגדות

הסגולית היא $\Omega \times m$. יחידת התנגדות סגולית נוספת היא $\Omega \times cm$. הקשר בין יחידות ההתנגדות הסגולית הוא

$$1\frac{\Omega \times mm^2}{m} = 10^{-6}\Omega \times m = 10^{-4}\Omega \times cm$$



דוגמה 3-4

נתון תיל טונגסטן, שאורכו 6 מטרים, ושטח החתך שלו 3 מילימטרים רבועים.

ההתנגדות הסגולית של טונגסטן היא $0.055\frac{\Omega \times mm^2}{m}$. מהי ההתנגדות של תיל הטונגסטן?

פתרון

נציב במשוואת ההתנגדות (3-3) את הנתונים שבדוגמה:

$$R = \frac{\rho \ell}{A} = \frac{0.055 \times 6}{3} = 0.11\,\Omega$$



בטבלה (3-1) רשומות ההתנגדויות הסגוליות של מוליכים שונים. בהמשך נראה כי ההתנגדות – וגם ההתנגדות הסגולית – תלויות בטמפרטורה. ההתנגדויות הסגוליות, הרשומות בטבלה 3-1, נמדדו ב-20°C.

המוליך	ההתנגדות הסגולית ביחידות $\frac{\Omega \times mm^2}{m}$	המוליך	ההתנגדות הסגולית ביחידות $\frac{\Omega \times mm^2}{m}$
אבץ	0.064	נחושת	0.018
אלומיניום	0.027	ניקל	0.078
ברזל	0.120	עופרת	0.220
זהב	0.028	פחם	35
טונגסטן	0.055	פליז	0.075
כסף	0.016	קונסטנטן	0.500
כרום-ניקל	1.000		

טבלה 3-1 התנגדויות סגוליות של מוליכים שונים

3.5 חישובי התנגדות, התנגדות סגולית, אורך ושטח חתך

נדגים עכשיו כיצד משתמשים במשוואה $R = \frac{\rho \ell}{A}$, כדי לחשב את אחד מארבעת הגדלים המופיעים בה, כאשר ידועים שלושת הגדלים האחרים. כפי שראינו, ההתנגדות הסגולית נתונה, בדרך-כלל, ביחידות $\frac{\Omega \times \mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}}$. כדי להשתמש בצורה נכונה במשוואה $R = \frac{\rho \ell}{A}$, אנו צריכים לבטא את ההתנגדות ביחידות אום (Ω), את האורך במטרים (m), ואת שטח החתך במילימטרים רבועים (mm^2). אם אחד הגדלים נתון ביחידות אחרות, יש לתרגם אותן ליחידות הדרושות. למשל: אם האורך נתון בסנטימטרים יש לתרגם אותו למטרים; אם שטח החתך נתון בסמ"ר יש לתרגם אותו לממ"ר. נדגים זאת.



דוגמה 3-5

אורך מוליך כרום-ניקל הוא 20 סנטימטרים, ושטח החתך שלו 4 סנטימטרים רבועים. מהי התנגדות המוליך?

פתרון

אורך המוליך נתון בסנטימטרים, ואנו צריכים לתרגם זאת למטרים:

20 ס"מ = 0.2 מ'

שטח החתך של המוליך נתון בסמ"ר, ועלינו לתרגם זאת לממ"ר. כידוע:

1 ס"מ = 10 מ"מ

1 סמ"ר = 10 מ"מ × 10 מ"מ = 100 ממ"ר

ולכן:

4 סמ"ר = 400 ממ"ר

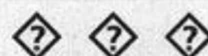
ההתנגדות הסגולית של כרום-ניקל היא

$$1\frac{\Omega \times \mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}}$$

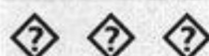
נציב במשוואת ההתנגדות (3-3) את הגדלים הנתונים, ביחידות המתאימות, ונקבל:

$$R = \frac{\rho \ell}{A} = \frac{1 \times 0.2}{400} = 0.0005\,\Omega$$





שאלות חזרה



שאלה 3-8

נתונים שני מוליכים, הנבדלים רק באורך. אורך מוליך א – 20 ס״מ, ואורך מוליך ב – 70 ס״מ.

א. לאיזה משני המוליכים יש התנגדות גדולה יותר?

ב. מהו היחס בין התנגדויות המוליכים?

שאלה 3-9

שני מוליכים, האחד עבה והאחר דק, עשויים מאותו חומר, ואורכם שווה. לאיזה משני המוליכים התנגדות קטנה יותר?

שאלה 3-10

מהי ההתנגדות הסגולית של מוליך, שאורכו 200 מטר, שטח החתך שלו 3 ממ״ר, והתנגדותו $5\ \Omega$?

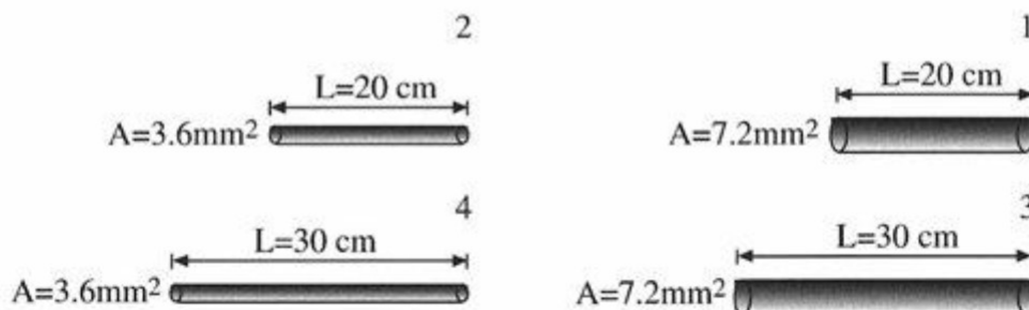
שאלה 3-11

באיור 3-9 נתונים ארבעה מוליכים העשויים כולם מאותו חומר.

א. סמן את המוליך, שהתנגדותו הקטנה ביותר.

ב. סמן את המוליך, שהתנגדותו הגדולה ביותר.

ג. חשב את ההתנגדות של שני מוליכים אלה, בהנחה שהם עשויים נחושת.



איור 3-9

שאלה 3-12

רוצים לחשב את האורך של תיל נחושת מגולגל. לשם כך מודדים את התנגדות התיל ואת שטח החתך שלו. הנה התוצאות: ההתנגדות – $5\ \Omega$; שטח החתך – 20 ממ"ר. מהו אורך התיל? (ההתנגדות הסגולית של הנחושת נתונה בטבלה 3-1.)

שאלה 3-13

א. נתון תיל ברזל שאורכו 9 מטר, ושטח החתך שלו 5 ממ"ר. מהי ההתנגדות של תיל הברזל?

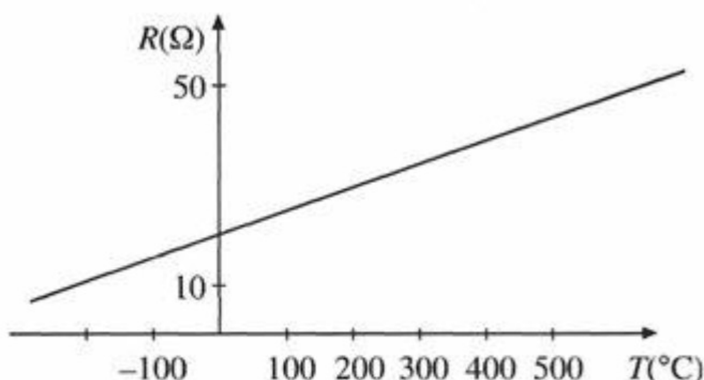
ב. נתון תיל נחושת, שהתנגדותו שווה להתנגדות תיל הברזל הנתון בסעיף א. אורך תיל הנחושת 18 מטר. מהו שטח החתך של תיל הנחושת?

3.6 השפעת הטמפרטורה על ההתנגדות

עד עכשיו למדנו על שלושה גורמים, המשפיעים על ההתנגדות של מוליך: אורך המוליך; שטח החתך של המוליך; והחומר שממנו עשוי המוליך, כלומר: ההתנגדות הסגולית של המוליך. ניווכח עכשיו כי התנגדות מוליך תלויה גם בטמפרטורה, שבה נמצא המוליך.

בדרך-כלל, ככל שהטמפרטורה גבוהה יותר, מספר ההתנגשויות של האלקטרונים החופשיים ביוני הסורג – גדול יותר, ולכן ההתנגדות למעבר זרם בסורג גדולה יותר. לכן ההתנגדות למעבר זרם במוליך מתכתי – גְּדֵלָה עם הטמפרטורה של המוליך.

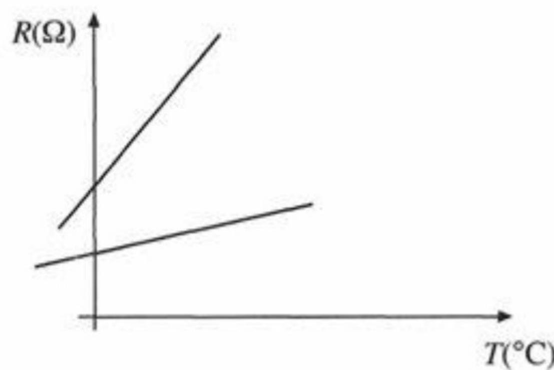
בגרף שבאיור 3-10 מתוארת, בקירוב רב, ההתנגדות של מוליך מתכתי בתלות בטמפרטורה. אנו רואים שההתנגדות גדלה עם הטמפרטורה. בתחום רחב של טמפרטורות, הגרף הוא קו ישר. בנחושת, למשל, מתקבל קו ישר בין 100°C – לבין 500°C.



איור 3-10 תלות ההתנגדות בטמפרטורה של מוליך מתכתי

בדרך-כלל, מוליכים שונים נבדלים זה מזה בתלות ההתנגדות שלהם בטמפרטורה. באיור 3-11 נתון התיאור הגרפי של תלות ההתנגדות בטמפרטורה של שני מוליכים שונים.

באיור 3-11 אפשר לראות, ששני הישרים נבדלים זה מזה בשיפוע שלהם. את שיפוע הישר, המתאר את תלות ההתנגדות של מוליך בטמפרטורה מבטאים באמצעות גודל הנקרא מקדם הטמפרטורה של המוליך. את מקדם הטמפרטורה מסמנים באות היוונית α (אלפא). מקדם הטמפרטורה נמצא ביחס ישר לשיפוע הישר – בתנאים מסוימים.
דיון נוסף בנושא זה – חורג ממסגרתנו.



איור 3-11 תלות ההתנגדות בטמפרטורה של שני מוליכים

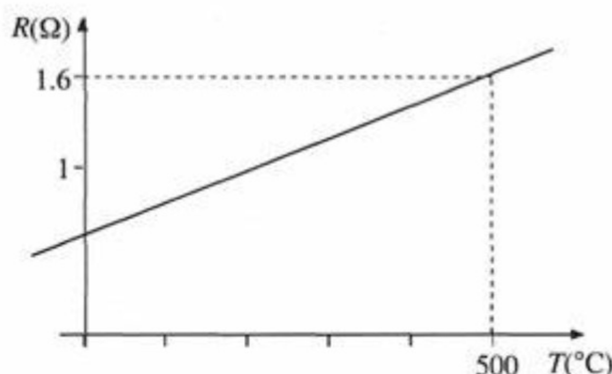
למקדם הטמפרטורה α יש חשיבות מעשית רבה. מוליך בעל מקדם טמפרטורה קטן שומר על התנגדות קבועה כמעט גם בשינויי טמפרטורה גדולים. לעומת זאת, במוליך בעל מקדם טמפרטורה גדול, ההתנגדות משתנה מאוד עם שינוי הטמפרטורה. במעגלים חשמליים ואלקטרוניים רבים דרושות התנגדויות קבועות, על-אף שינויי הטמפרטורה; כלומר, דרושים בהם מוליכים בעלי מקדם טמפרטורה קטן כל האפשר.

מדידים

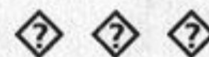
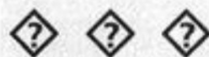
על עיקרון זה של שינוי ההתנגדות עם הטמפרטורה, בונים מכשירים למדידת טמפרטורה. לצורך כך משתמשים בחומרים, שידוע גרף ההתנגדות שלהם בתלות בטמפרטורה. חומרים כאלה נקראים **מדידים**.

אם רוצים לדעת את הטמפרטורה של תנור לוהט, למשל, מניחים את המדיד בתנור. לאחר שהמדיד מתחמם (והטמפרטורה שלו מגיעה לטמפרטורה שבתוך התנור), מודדים את התנגדות המדיד. לפי הגרף של תלות התנגדות המדיד בטמפרטורה, אפשר לדעת את הטמפרטורה של המדיד.

באיור 3-12 מתואר גרף כזה. נניח כי אחרי הוצאת המדיד מהתנור, התנגדות המדיד היא 1.6 Ω. מהגרף נסיק כי הטמפרטורה בתנור הייתה 500°C. בשיטה זו משתמשים למדידת טמפרטורות גבוהות, שקשה למדוד אותן בדרך רגילה, או למדידת טמפרטורות במקומות, שאין גישה אליהם בזמן המדידה (למשל: סלילי מנוע בזמן פעולת המנוע).



איור 3-12

 **שאלות חזרה** 

שאלה 3-14

א. נתונים שני מוליכים, העשויים מאותו חומר, ונמצאים באותה טמפרטורה. האם לחומרים אלה יכולה להיות התנגדות שונה? נמק.

ב. האם לחומרים אלה יכולה להיות התנגדות סגולית שווה?

שאלה 3-15

דרוש מוליך מתכתי, שהתנגדותו תהיה קטנה ככל האפשר. סמן את התכונות הנדרשות ממוליך כזה ואת הטמפרטורה שבה עליו להימצא.

- התנגדות סגולית גדולה/קטנה ככל האפשר
- אורך גדול/קטן ככל האפשר
- שטח חתך גדול/קטן ככל האפשר
- טמפרטורה גבוהה/נמוכה ככל האפשר.

שאלה 3-16

נתונים מוליכי טונגסטן, השונים בשטח החתך שלהם. אורך כל אחד מהמוליכים הוא 5 מ׳. מה צריך להיות שטח החתך של מוליך טונגסטן כזה, כדי שהתנגדותו תהיה $12\ \Omega$?

שאלה 3-17

בטמפרטורה של $20°C$, ההתנגדות של מוליך נחושת היא $3\ \Omega$. האם ההתנגדות המוליך ב-$30°C$ תהיה גדולה יותר, קטנה יותר, או ללא שינוי? נמק.

3.7 בידוד ומבדדים

עד כה דיברנו על מוליכים מתכתיים. יש גם מוליכים לא-מתכתיים, כדוגמת הפחם, שהוא מוליך המשמש לצרכים רבים. התכונה האופיינית למוליכים היא התנגדות סגולית קטנה. אולם יש גם חומרים, שההתנגדות הסגולית שלהם גדולה. לשם השוואה: ההתנגדות הסגולית של כרום-ניקל היא $1\frac{\Omega\times mm^2}{m}$, ואילו ההתנגדות הסגולית של הזכוכית היא $10^{22}\frac{\Omega\times mm^2}{m}$.

חומר, שהתנגדותו הסגולית גדולה מאוד, הוא חומר מבודד. זכוכית, למשל, היא חומר מבודד, כלומר: מבדד. גם חרסינה, בקליט, נציץ (מיקה), קווארץ ופרפין הם מבדדים. מאחר שלמבדדים יש התנגדות סגולית גדולה מאוד, הם מונעים, למעשה, מעבר זרם דרכם.

חומרים מבודדים משמשים לצרכים רבים. נתבונן, למשל, במה שקורה בבתינו. מכשירי החשמל מחוברים לשקעים באמצעות חוטי חשמל מוליכים. אילו חוטי החשמל היו חשופים, היינו נתונים לסכנת התחשמלות – בכל פעם שהיינו משתמשים במכשיר חשמלי. משום כך עוטפים את חוטי החשמל בחומר פלסטי מבודד, המונע מעבר זרם לגוף האדם.

עוד שימוש במבדדים נעשה כדי למנוע בזבוז בחשמל. מאחר שהמבדדים אינם מעבירים זרם, משתמשים בהם כדי למנוע מן הזרם החשמלי להגיע למקומות לא רצויים.

כאשר באים לבחור מבדד, שישמש לציפוי חוט מוליך – או לבידוד בציוד חשמלי מסוים – צריך לבדוק את תכונות המבדד ואת התנאים שבהם יפעל הציוד החשמלי. לדוגמה, צריך לבדוק את התנאים האלה:

- תחום הטמפרטורות שבו צריך הציוד לפעול;
- תחומי הלחות המומלצים לפעולת הציוד;
- דרישות בטיחות מהציוד.

נביא כאן כמה דוגמאות לשימוש במבדדים, ונתאר בקצרה את תכונות המבדדים השונים.

- חוטי החשמל בבתינו מצופים בחומר הנקרא פי.וי.סי. (PVC). ה-PVC, שהוא חומר פלסטי, אינו סופג רטיבות. בגלל תכונתו זו, משמש ה-PVC גם לבידוד כבלים תת-קרקעיים. החיסרון של ה-PVC הוא, שנגרם לו נזק, כשהוא גלוי לקרני השמש. לעומת זאת, לציפוי נחושת – משתמשים באמייל, כי זהו חומר חזק ונפחו קטן.

- במתקני חשמל שונים, משתמשים לצורך בידוד בחומרים הפלסטיים פוליאתילן וטפלון. הפוליאתילן חזק פחות מ-PVC, אך עמיד יותר בפני חומצות. הטפלון משמש כבידוד בטמפרטורות גבוהות ובזרמים קטנים (באלקטרוניקה, למשל).

יש מבדדים ההופכים למוליכים טובים בטמפרטורות גבוהות. ברור כי יש להתחשב בתכונה זו של המבדדים, כשרוצים להשתמש בהם. לדוגמה, חלק ממכונות החשמל פועלות בטמפרטורות גבוהות, ויש לבחור עבורן במבדדים, שההתנגדות הסגולית שלהם קטנה רק במעט כאשר הטמפרטורה עולה.

חומר פלסטי מוליך

ראינו כי חומרים פלסטיים הם מבדדים בטמפרטורת החדר. האם יש חומר פלסטי, המוליך חשמל? אכן, יש חומר כזה, והוא התגלה במקרה.

הפלסטיק המוליך נוצר במקרה בשנת 1970. סטודנט יפני, שהשתתף במחקר מסוים במעבדה, ניסה לקבל פלסטיק שחור. אולם הוא טעה בכמויות החומרים שהוסיף לתערובת, ובמקום פלסטיק שחור קיבל פלסטיק מוכסף.

תכונות החומר החדש לא התגלו מיד. הפלסטיק המוכסף הונח על מדף צדדי במעבדה, והחוקרים לא התעניינו בו. חמש שנים לאחר שהחומר היה מונח על המדף, ביקר במעבדה היפנית פרופסור אמריקאי. המארחים הציגו בפניו את החומרים שפיתחו, והראו לו גם את החומר המוזר, שנוצר במקרה.

המדען האמריקאי גילה עניין רב בפלסטיק החדש, והחל לחקור אותו בשיתוף פעולה עם החוקר היפני שניהל את המעבדה. כיום מנסים לייצר מצברים, תוך שימוש בחומר פלסטי זה.

סיכום פרק 3

- ההתנגדות R של מוליך היא היחס בין המתח U על המוליך – לבין הזרם I במוליך: $R=\frac{U}{I}$.
- יחידת ההתנגדות היא אום (Ω). למוליך יש התנגדות של אום אחד, אם מתח של וולט אחד בין קצותיו – גורם לכך, שזרם של אמפר אחד יזרום דרך המוליך.
- ההתנגדות R נתונה על־ידי $R=\rho\frac{\ell}{A}$ (ℓ – אורך המוליך; A – שטח החתך של המוליך; ρ – ההתנגדות הסגולית של המוליך). יש להקפיד על היחידות השונות, כדי לקבל את ההתנגדות ביחידות הנכונות.
- למוליכים יש התנגדות סגולית קטנה. התנגדות מוליך גְּדֵלָה בדרך-כלל עם הטמפרטורה. המבודד (או המבדד) הוא חומר בעל התנגדות סגולית גדולה. יש מבדדים, ההופכים למוליכים טובים בטמפרטורות גבוהות. המדידים הם חומרים, שידוע גרף ההתנגדות שלהם בתלות בטמפרטורה. משתמשים במדידים לבניית מכשירים למדידת טמפרטורה.

4

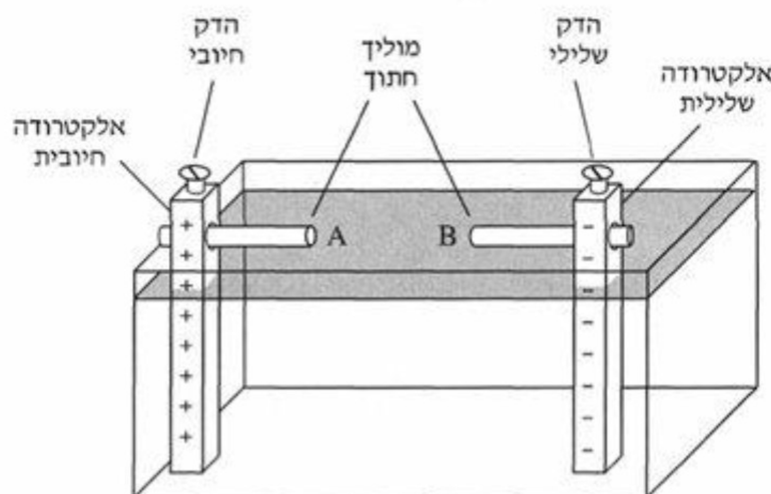
המעגל החשמלי

4.1 מרכיבי המעגל החשמלי

צרכן (עומס)

ראינו כי כאשר מחברים מוליך בין האלקטרודות של מקור מתח, נוצר במוליך זרם. הזרם זורם במוליך, כל זמן שֶׁיֵש הפרש פוטנציאלים בין האלקטרודות. אבל אם נחתוך את המוליך, כפי שמתואר באיור 4-1, הזרם ייפסק, אף-על-פי שעדיין יש הפרש פוטנציאלים בין האלקטרודות של מקור המתח. אם לא נציין אחרת, כאשר נכתוב "מקור", נתכוון ל"מקור מתח".

נציין כאן כי כשעוסקים במקור מתח ובחיבור מוליך לאלקטרודות של המקור, מתייחסים בדרך-כלל להדקים ולא לאלקטרודות ואף אנו נעשה כך לעתים קרובות. ההדקים מתוארים באיור 4-1. כאמור, תא חשמלי הוא דוגמה למקור. האלקטרודות בתא החשמלי שקועות בתוך תמיסה, ונהוג לומר כי התמיסה נמצאת בין ההדקים.



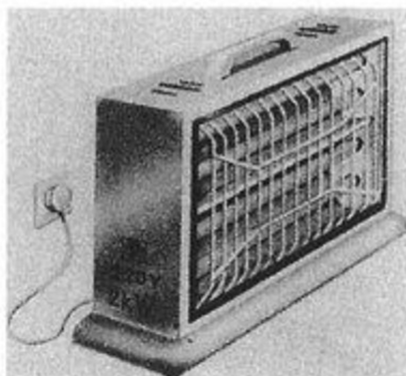
איור 4-1 מוליך חתוך מחובר להדקי מקור המתח

כאשר המוליך שלם, האלקטרונים החופשיים במוליך נעים מההדק השלילי של מקור המתח – אל עבר ההדק החיובי שלו. כאשר המוליך נחתך, האלקטרונים נעים – בהשפעת הכוח החשמלי הפועל עליהם – לנקודת הנתק B של המוליך, ומצטברים שם. תהליך זה נמשך חלקיק קטן של שנייה, ומסתיים כאשר הפוטנציאל בנקודת הנתק B – שווה לפוטנציאל של ההדק השלילי של מקור המתח.

התהליך מסתיים, כי מטענים נעים בכיוון מסוים, רק כאשר יש הפרש פוטנציאלים. ברגע שנוצר שוויון פוטנציאלים, תנועת האלקטרונים נפסקת, כלומר, הזרם נפסק. הסיבה להצטברות המטענים ולהפסקת הזרם היא, שהאלקטרונים החופשיים אינם יכולים "לקפוץ" – בדרך-כלל – מהמוליך החוצה, לכן הם מצטברים בנקודת הנתק B.

כדי שיהיה זרם במוליך, אנו צריכים לסגור את הקטע המנותק בין A ל-B על-ידי "משהו", שבו יוכלו האלקטרונים להמשיך ולנוע אל ההדק החיובי. כלומר, אנו צריכים לדאוג לכך, שלאלקטרונים יהיה מסלול סגור לנוע בו מההדק השלילי להדק החיובי.

ה"משהו", שיסגור את הקטע החתוך בין הנקודות A ו-B, יכול להיות קטע של תיל מוליך, אבל בדרך-כלל זהו מכשיר חשמלי, המנצל את הזרם החשמלי למטרות מועילות.* מכשיר כזה נקרא **צרכן** או **עומס**. דוגמאות לצרכנים: מגהץ, תנור בישול, נורה חשמלית. דוגמאות נוספות מתוארות באיורים 4-2, 4-3, ו-4-4-4. במכשירים אלה יש חלק, שההתנגדות החשמלית שלו גדולה יחסית להתנגדות של תיל מוליך, ולכן חלק זה נקרא לפעמים **נגד**. לעִתים קרובות, כאשר אין צורך בתיאור מפורט של הצרכן, מייצגים אותו על-ידי נגד.

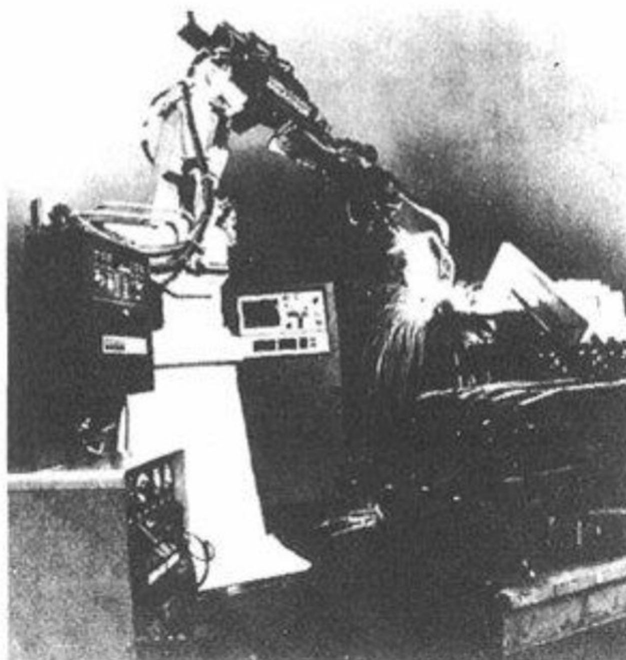


איור 4-2 תנור חימום חשמלי

* בדרך-כלל, כאשר מנצלים זרם חשמלי למטרות מועילות, משתמשים במקור מתח שאינו תא חשמלי. אבל כרגע אין חשיבות לתיאור המדויק של מקור המתח, ואנו מייצגים אותו על-ידי תא חשמלי. בהמשך נלמד על מקור מתח מסוג אחר.



איור 4-3 מכונת כביסה



איור 4-4 הצרכן במעגל חשמלי יכול להיות מכשיר מתוחכם.
בתמונה רואים רובוט מבוקר מחשב המשמש בתעשייה

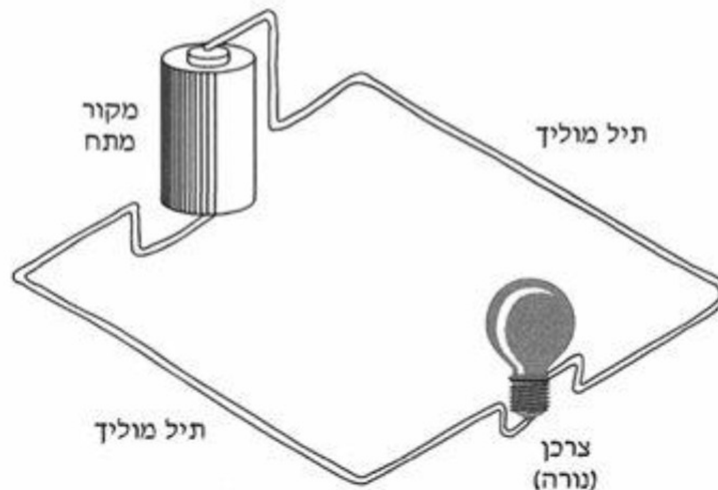
כאשר זרם עובר בנגד, יש התנגשויות בין האלקטרונים לבין היונים בחומר, שממנו עשוי הנגד. כתוצאה מכך הנגד מתחמם. לכן נגדים משמשים לפעמים כגופי חימום.

מעגל חשמלי

כבר אמרנו, שכדי שיזרום זרם בתיל מוליך ובצרכן המחוברים למקור מתח, צריך לדאוג שיהיה מסלול סגור, שבו יוכלו האלקטרונים לנוע. בהתאם לכך, נגדיר מושג חדש:

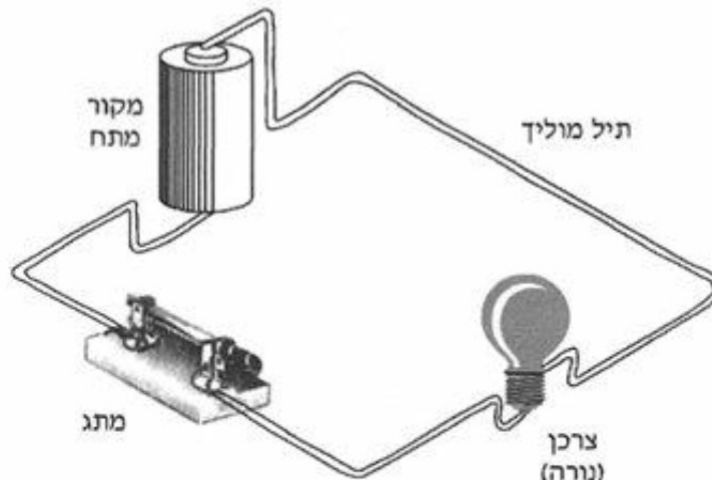
*מסלול סגור, הכולל מקור מתח וצרכן, שכיוון הזרם המוסכם בו הוא מההדק החיובי של מקור המתח – אל ההדק השלילי, דרך הצרכן, נקרא **מעגל חשמלי סגור**, ובקיצור: **מעגל חשמלי**.*

דוגמה למעגל חשמלי סגור אפשר לראות באיור 4-5.



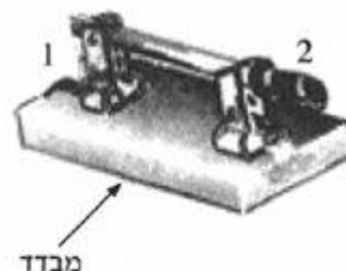
איור 4-5 מעגל חשמלי סגור

בדרך-כלל, איננו רוצים שהצרכן יפעל כל הזמן, אלא שנוכל לחבר את הצרכן או לנתק אותו, לפי הצורך. לשם כך מחברים במעגל מתג (או מפסק). מעגל חשמלי שנסגר בעזרת מתג מתואר באיור 4-6.



איור 4-6 מעגל חשמלי שנסגר בעזרת מתג

באיור 4-7 מתואר מתג פשוט, בשני מצבים: כאשר הוא סגור, וכאשר הוא פתוח.



מבדד

מתג סגור



מבדד

מתח פתוח

איור 4-7 מתג פשוט

המתג פועל כך:

החלקים 1 ו-2 קבועים במקומם. הם עשויים ממתכת, ואליהם מחברים את קצות התיל המוליך. לחלק 1 מחוברת ידית דומה לסכין, העשויה גם היא ממתכת. קצה הידית מכוסה בחומר מבודד. חלק 2 עשוי משתי לוחיות מתכת קרובות זו לזו. כאשר מורידים את הידית, היא נכנסת בין הלוחיות, ויוצרת אִתָן מגע הדוק. במצב זה, המתג סגור. כאשר מרימים את הידית, נוצר רווח בינה לבין לוחיות המתכת. במצב זה, המתג פתוח.

כאשר המתג פתוח, אין מסלול סגור לאלקטרונים, ולכן לא זורם זרם במעגל, והמעגל נקרא אז **מעגל חשמלי פתוח**. כאשר המתג סגור, המעגל סגור, זורם בו זרם, והצרכן יכול לפעול. באיור 4-8 אפשר לראות מתג מעשי.



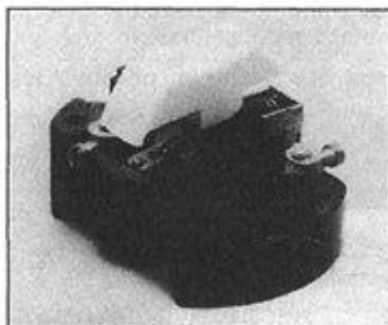
איור 4-8 מתג ממשי

מתגים חשמליים

המתגים הם רכיבים שימושיים במעגל החשמלי. כיום מצויים בשוק מתגים מסוגים רבים מאוד. נכיר כאן שני מתגים, שחלק מאתנו משתמשים בהם יום-יום בבתינו: מתג החשמל שבעזרתו מדליקים ומכבים את האור, ומתג לחצן המפעיל את הפעמון שבכניסה לבית.

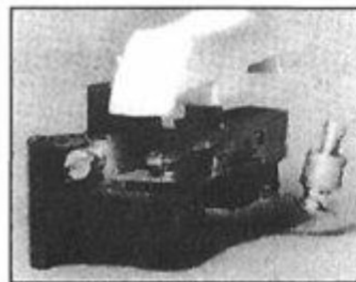
מתג הדלקה וכיבוי אור

באיור 4-9 רואים מתג טיפוסי המשמש להדלקה ולכיבוי אור.

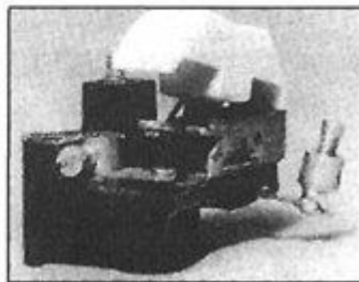


איור 4-9 מתג הדלקה וכיבוי אור

באיור 4-10 נתון המתג – לאחר שהוסר חלק ממנו, כך שנוכל ללמוד את המבנה העקרוני ואופן הפעולה של מתג זה.



מתג סגור



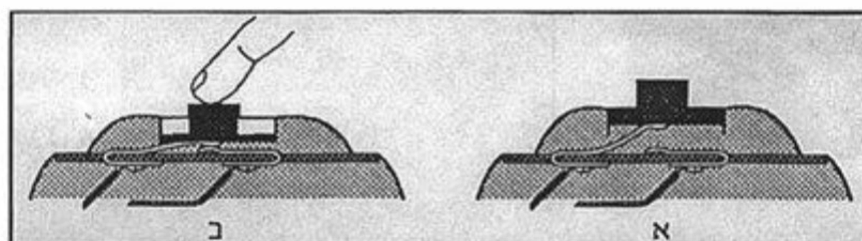
מתח פתוח

איור 4-10 תמונות חתך של המתג המתואר באיור 4-9

המתג בנוי משלוש לוחיות: שתי לוחיות מתכת קבועות, שאליהן מחברים את קצות המוליך, ולוחית נוספת, גם היא ממתכת, שאפשר להזיז אותה. אל הלוחית השלישית מחובר כפתור הפעלה קפיצי, העשוי מחומר מבודד, ובעזרתו אפשר להזיז את הלוחית. כאשר הלוחית השלישית נוגעת בשתי הלוחיות האחרות, המתג סגור. כאשר מזיזים את הלוחית, נשאר מרווח, ואז המתג פתוח.

מתג לחצן

המתג בפעמון הדלת הוא מתג לחצן. כאשר לוחצים על הכפתור, נוצר מגע בין לוחית המתכת, המחוברת לכפתור, לבין לוחית המתכת שמתחתיה. המתג נסגר והפעמון מצלצל. כאשר עוזבים את הכפתור, הוא חוזר למקומו הקודם – בגלל הקפיץ המחובר אליו. המתג נפתח, והפעמון מפסיק לצלצל.



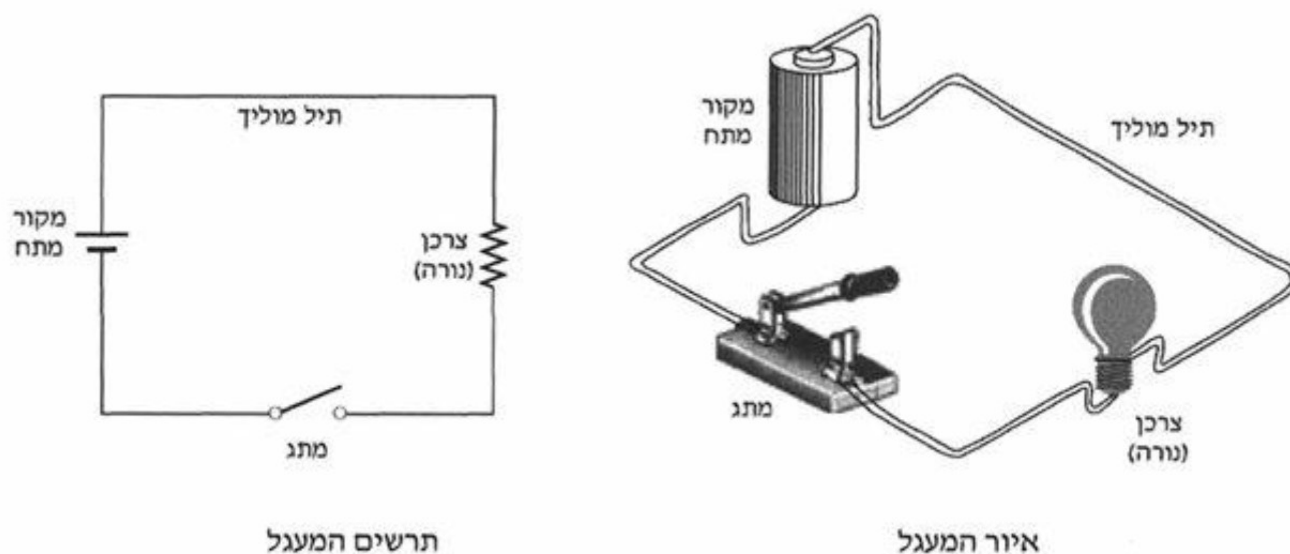
איור 4-11 מתג לחצן

עד כה כבר הכרנו את החלקים העיקריים של המעגל החשמלי: מקור מתח, תיל מוליך, צרכן, מתג. כאשר עוסקים במעגלים חשמליים, נוהגים לשרטט אותם, ולשם כך משתמשים בסמלים מקובלים. בטבלה 4-1 מופיעים הרכיבים במעגל החשמלי, תפקידיהם, והסמלים המקובלים שלהם.

החלק	תפקידו במעגל	סימולו	הערות
מקור מתח	מספק מתח (ואנרגיה) למעגל.		סמל זה מייצג מקור מתח קבוע בזמן. הקו הארוך מסמן את ההדק בעל הפוטנציאל הגבוה יותר. מסומן גם בצורה זו :
צרכן (נגד)	מנצל את הזרם, הנוצר על-ידי מקור המתח, לשימושים שונים, כגון : חימום, תאורה וכו'.		מסומן לפעמים גם בצורה זו :
תיל מוליך	מחבר בין חלקים במעגל, ליצירת מעגל סגור.		התיל המוליך נקרא גם **קו**.
מתג	סוגר או פותח את המעגל.	סגור פתוח	

טבלה 4-1 רכיבים במעגל החשמלי וסמליהם

נביא עתה שוב את המעגל הפשוט, שכבר הכרנו קודם, ולצידו תרשים המעגל, שבו הרכיבים השונים מיוצגים על-ידי הסמלים המקובלים שלהם. במקרה הזה הצרכן הוא נורה, והוא מיוצג בתרשים על-ידי נגד.



איור 4-12

מקובל לרשום ליד כל חלק במעגל החשמלי את ערכו. ליד מקור המתח רושמים את מתח המקור, וליד הנגד רושמים את ערך ההתנגדות שלו, באופן הבא:

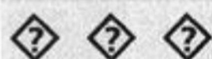


איור 4-13

במעגל חשמלי יכולים להיות כמה מקורות מתח וגם כמה צרכנים. בהמשך נכיר מעגלים כאלה. לעת עתה נעסוק במעגלים פשוטים בלבד.

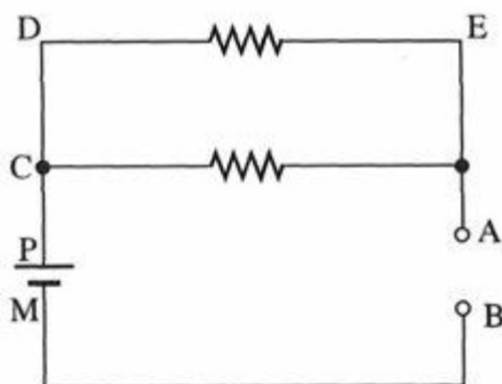


שאלות חזרה



שאלה 4-1

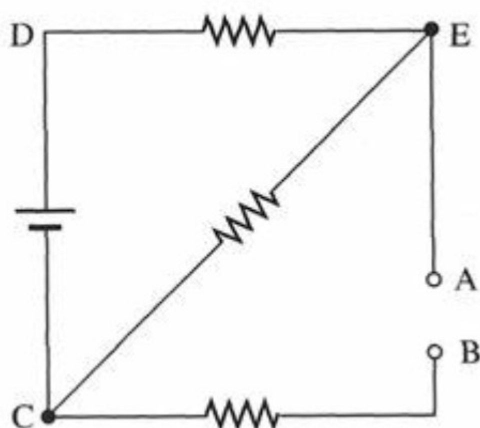
האם המעגל שבאיור 4-14 – הוא מעגל סגור?



איור 4-14

שאלה 4-2

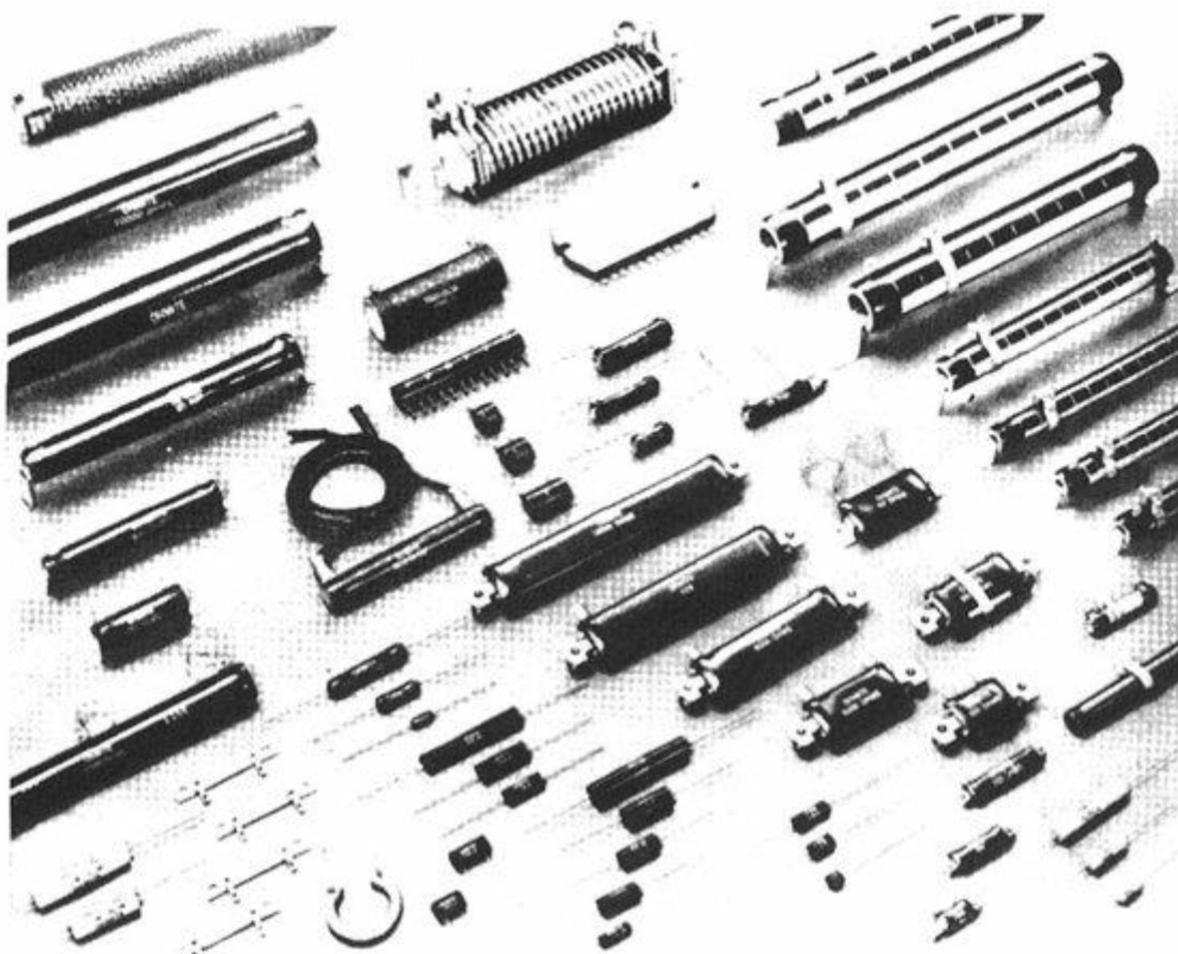
התבונן באיור 4-15. האם המעגל EDCE הוא מעגל סגור?



איור 4-15

4.2 סוגי נגדים

כאשר מזרימים זרם חשמלי באמצעות מקור מתח, משתמשים בתַּיִלִים מוליכים, שהתנגדותם קטנה ככל האפשר. אבל לפעמים רוצים ליצור בכוונה התנגדות לזרם החשמלי, כדי להקטין את הזרם, או כדי ליצור חום, או לצרכים אחרים. לשם כך משתמשים בנגדים. הנגדים מיוצרים בצורות שונות, ובערכי התנגדות רבים. באיור 4-16 נתונים סוגים שונים של נגדים.



איור 4-16 סוגי נגדים

מבנה נגדים

הנגדים מתחלקים לשלושה סוגים עיקריים, על-פי המבנה שלהם.

א. נגדי שכבה

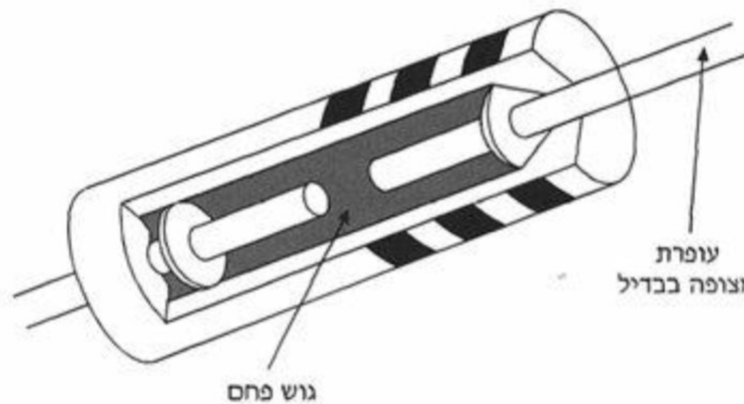
נגד שכבה (איור 4-17) בנוי מגליל עשוי קרמיקה מצופה בשכבה מתכתית דקה או בשכבת פחם דקה.



איור 4-17 נגד שכבה

ב. נגדי פחם

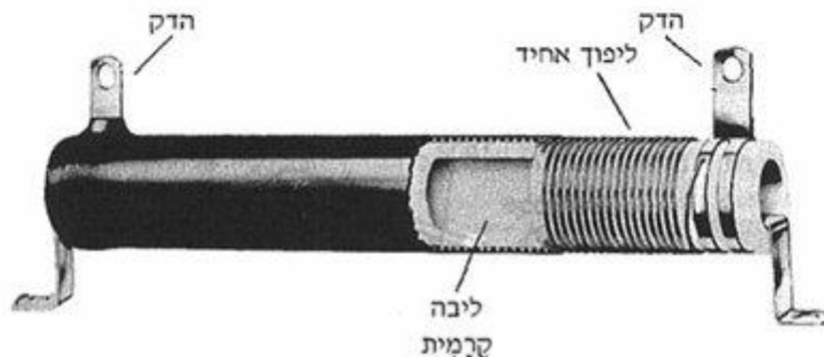
נגד פחם (איור 4-18) עשוי מגוש חומר שהוא בעיקר פחם (בעל התנגדות גדולה למדי), או מגליל של חומר מבודד (למשל: חרסינה, זכוכית, קרמיקה) מצופה פחם. השימוש בנגדי פחם הולך ופוחת.



איור 4-18 נגד פחם

ג. נגדים מלופפים

נגד מלופף (איור 4-19) עשוי מתיל מתכת דק, בעל התנגדות סגולית גדולה למדי. התיל מלופף על גבי גליל של חרסינה, או של חומר מבודד אחר. (מלפפים את התיל לצורת סליל, כדי שיתפוס מקום מועט למרות אורכו.)



איור 4-19 נגד מלופף

תכונות נגדים

התכונה החשובה ביותר של הנגד היא, כמובן, ערך ההתנגדות שלו. אבל יש לו עוד שתי תכונות חשובות אחרות:

א. מידת ההתחממות המרבית, שהנגד יכול לסבול בלי להינזק

תכונה זו תלויה ביכולתו של הנגד לפזר את החום המתפתח בו, כתוצאה מהזרם שזורם בו. תכונה זו תלויה בעיקר בצורתו של הנגד, כי ככל ששטח הפנים של הנגד גדול יותר, פיזור החום לסביבה טוב יותר.

ב. תלות ההתנגדות בטמפרטורה

תכונה זו תלויה בתכונות החומר שממנו עשוי הנגד.

היצרנים נוהגים לרשום על הנגד – לא רק את ערך ההתנגדות שלו, אלא גם את אחוז השגיאה, שבו נתון ערך ההתנגדות. אחוז השגיאה של ההתנגדות נקרא **סְבולת**. לדוגמה, אם נתון כי הסבולת היא 10%, פירוש הדבר שהתנגדות הנגד יכולה להיות גדולה מהערך הרשום – ב-10% לכל היותר, או קטנה מהערך הרשום – ב-10% לכל היותר.



דוגמה 4-1

נתון נגד שרשום עליו 10 kΩ , והסבולת היא 5%. מה יכולה להיות ההתנגדות הקטנה ביותר והגדולה ביותר של הנגד?

פתרון

התנגדות הנגד יכולה להיות קטנה ב-5% לכל היותר מהערך הרשום עליו. לכן ההתנגדות הקטנה ביותר יכולה להיות

$$\frac{10\times95}{100}=9.5\ \text{k}\Omega$$

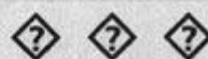
התנגדות הנגד יכולה להיות גדולה ב-5% לכל היותר – מהערך הרשום עליו. לכן ההתנגדות הגדולה ביותר יכולה להיות

$$\frac{10\times105}{100}=10.5\ \text{k}\Omega$$





שאלות חזרה



שאלה 4-3

מה יכולה להיות ההתנגדות הגדולה ביותר והקטנה ביותר של נגד, שרשום עליו $4.7\ k\Omega$, 5%? (רישום זה פירושו שסבולת הנגד היא 5%).

שאלה 4-4

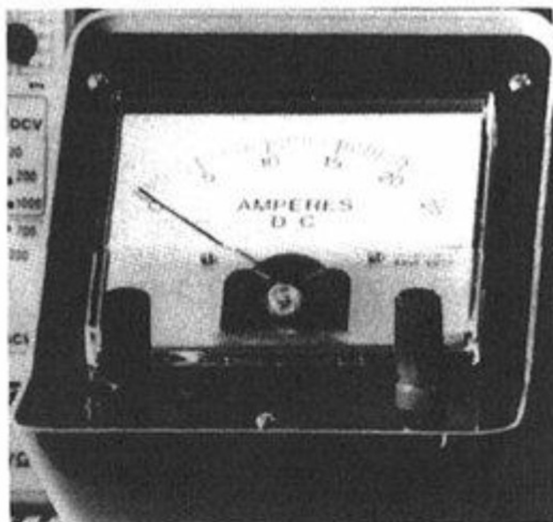
מה יכולה להיות ההתנגדות הגדולה ביותר וההתנגדות הקטנה ביותר של נגד, שרשום עליו $1.2\ k\Omega$, 10% ?

4.3 מדידות זרם ומתח במעגל חשמלי

כאשר רוצים למדוד את הזרם העובר במעגל חשמלי או את המתח בין שתי נקודות במעגל, צריך לחבר במעגל מכשירי מדידה.

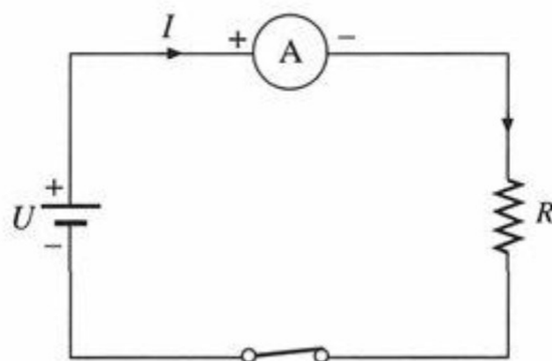
מד זרם

מד זרם הוא מכשיר המשמש למדידת זרמים. את עוצמת הזרם העובר במד הזרם קוראים באמצעות מחוג, הנמצא על לוח שנתות (איור 4-20), או באמצעות מספר המופיע על לוח תצוגה. למד זרם יש שני הדקים: הדק חיובי ("+"), והדק שלילי ("–"). מחברים את מד הזרם למעגל כך, שהזרם המוסכם יעבור מן ההדק החיובי שלו – אל ההדק השלילי. הסימון המקובל של מד הזרם הוא מד זרם מעשי מתואר באיור 4-20.



איור 4-20 מד זרם מעשי הכולל מחוג

באיור 4-21 רואים מעגל שבו מחובר מד זרם. הזרם, שרוצים למדוד, עובר דרך מד הזרם, מההדק החיובי אל ההדק השלילי. הזרם מסומן באות I, והכיוון שלו מסומן בעזרת חץ.

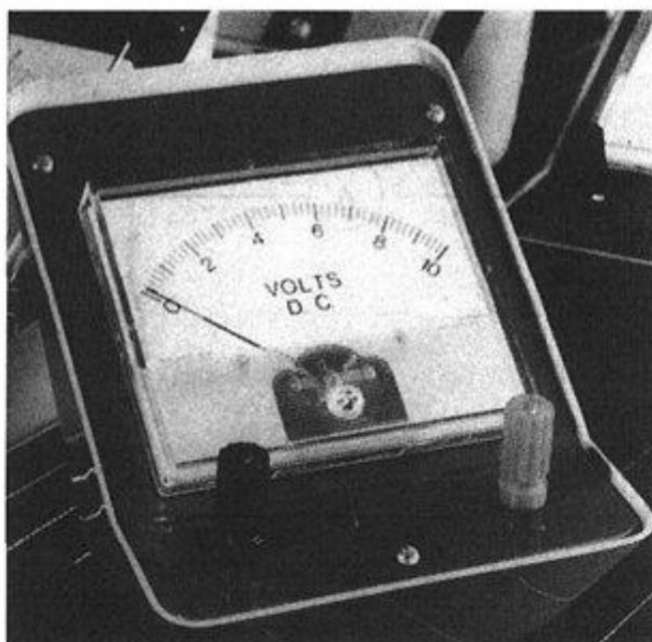


איור 4-21 מדידת זרם במעגל חשמלי

מד מתח

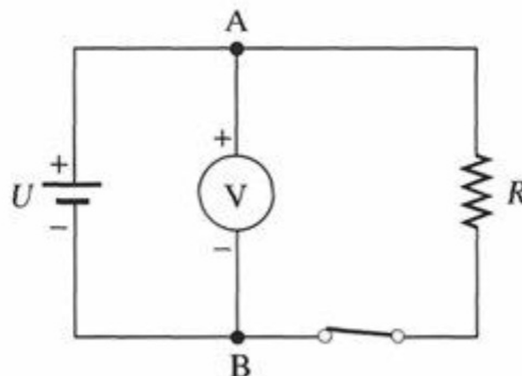
מד מתח הוא מכשיר המשמש למדידת המתח (הפרש הפוטנציאלים) בין שתי נקודות במעגל חשמלי. גם במד מתח קוראים את גודל המתח בעזרת מחוג (איור 4-22) או בעזרת מספר על לוח תצוגה. גם למד מתח יש שני הדקים : הדק חיובי ("+") והדק שלילי ("–").

כאשר רוצים למדוד מתח בין שתי נקודות במעגל מחברים את ההדק החיובי לנקודה שבה הפוטנציאל גבוה יותר ואת ההדק השלילי לנקודה שבה הפוטנציאל נמוך יותר. הסימון המקובל של מד המתח הוא . מד מתח מעשי מתואר באיור 4-22.



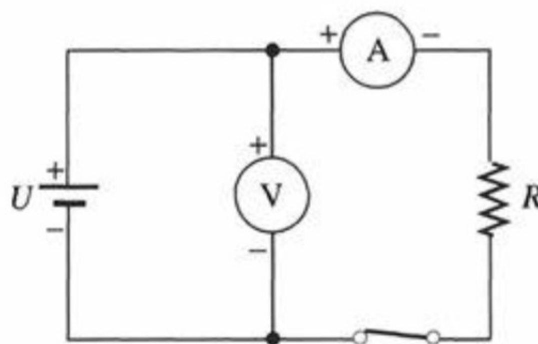
איור 4-22 מד מתח מעשי הכולל מחוג

באיור 4-23 רואים מעגל, שבו מחובר מד מתח. במעגל זה רוצים למדוד את המתח בין הנקודות A ו-B. בנקודה A הפוטנציאל גבוה יותר, לכן מחברים אליה את ההדק החיובי של מד המתח. בנקודה B הפוטנציאל נמוך יותר, לכן מחברים אליה את ההדק השלילי של מד המתח.



איור 4-23 מדידת מתח במעגל חשמלי

באיור 4-24 רואים מעגל, שבו מודדים – באותו זמן – גם את הזרם וגם את המתח.



איור 4-24 מדידת מתח וזרם במעגל חשמלי

נעיר כאן כי יש מכשירי מדידה, שבאמצעותם אפשר למדוד גם זרם וגם מתח. מכשיר מדידה כזה נקרא רב מודד. דוגמה למכשיר כזה אפשר לראות באיור 4-25. בשנים האחרונות משתמשים יותר ויותר ברב מודד ספרתי, שבו תוצאת המדידה מוצגת באמצעות מספר על לוח תצוגה. דוגמה לרב מודד ספרתי נתונה באיור 4-26.



איור 4-25 רב מודד אנלוגי

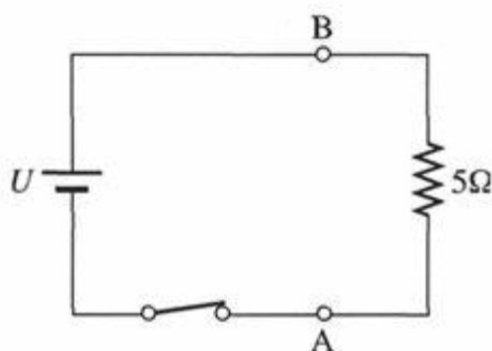


איור 4-26 רב מודד ספרתי

שאלות חזרה

שאלה 4-5

במעגל שבאיור 4-27 רוצים למדוד את המתח בין הנקודות A ו-B. הוסף למעגל מד מתח לצורך המדידה, וסמן את מקום ההדק החיובי ומקום ההדק השלילי של מד המתח.



איור 4-27

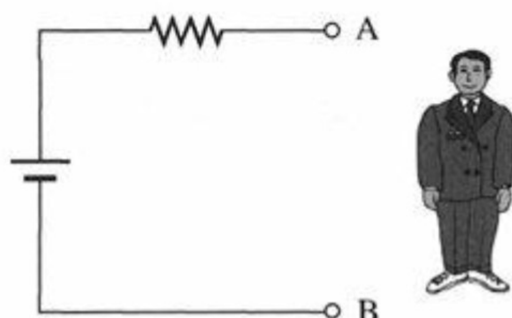
שאלה 4-6

רוצים למדוד את הזרם בנגד R שבאיור 4-27. הוסף למעגל מד זרם, וסמן את מקום ההדק החיובי ואת מקום ההדק השלילי של מד הזרם.

4.4 הסכנות הכרוכות בזרם החשמלי

כבר ראינו שבמקרים מסוימים, גוף האדם יכול להוליך חשמל. גוף האדם אינו מוליך טוב. התנגדותו הסגולית גדולה בהרבה מההתנגדות הסגולית של מוליך טוב כמו נחושת; ובכל-זאת, זרם חשמלי יכול לעבור דרך גוף האדם. כאשר הזרם, עובר דרך גוף האדם, גדול מדי, הדבר עלול להיות מסוכן מאוד. זרם הגדול מ-30 mA נחשב לזרם מסוכן, שעלול לגרום נזקים גדולים לגוף האדם.

כאשר זרם חשמלי כזה עובר דרך גוף האדם, אומרים שהאדם התחשמל, או שקיבל מכת חשמל. כיצד קורה שאדם מתחשמל? הדבר קורה כאשר האדם הופך להיות חלק ממעגל חשמלי סגור. לדוגמה, כאשר אדם נוגע בשני קצוות של מוליך המחובר למקור מתח; או כאשר הוא נוגע בכבל חשמלי קרוע. (גם אז עלול האדם להיות חלק ממעגל חשמלי, הכולל את האדמה, שאף היא מוליך). במקרה זה גוף האדם סוגר את המעגל, והזרם שזורם במעגל הסגור עובר דרך גוף האדם.



איור 4-28 אדם ליד מעגל חשמלי

ההתנגדות של גוף האדם היא בין 1 kΩ לבין 100 kΩ. הערך המדויק תלוי בכמה דברים, וביניהם מידת הלחות של העור. כשהעור לח, התנגדות הגוף קטנה בהרבה מאשר כשהעור יבש. משום כך אסור בשום אופן לגעת במכשירים חשמליים בידיים רטובות, כי אז סכנת ההתחשמלות גדולה הרבה יותר.

מכת חשמל

מכת חשמל עלולה להיגרם עקב מגע עם מקור מתח גבוה ברחוב, במפעל או בבית. הזרם גורם לפצעי כוויה קשים בנקודה שבה הוא נכנס לגוף ובנקודה שבה הוא יוצא מהגוף. תוך כדי מהלכו בגוף, בין נקודת הכניסה ליציאה, גורם הזרם נזק לרקמות שונות: עור, שרירים, עצבים וכלי דם. זרם ממקור מתח גבוה עלול לגרום לאיבוד הנשימה, הדופק וההכרה, ולהתמוטטות הנפגע למצב של מוות קליני.

איבחון: סימנים ותלונות

1. **נסיבות הפגיעה**
ברוב המקרים יצביעו נסיבות הפגיעה בבירור שמדובר בתאונת התחשמלות.
2. **פצעי כניסה ויציאה**
פצעי כוויה מפוחמים יופיעו בעור, במקומות שבהם הזרם נכנס לגוף ויוצא ממנו. כך לדוגמה: בהתאם לצורת ההתחשמלות — עלול להופיע פצע ביד וברגל, או פצעים בשתי הרגליים (כאשר מקור ההתחשמלות הוא על הקרקע).
3. **מוות קליני**
   - ★ איבוד ההכרה.
   - ★ הפסקת הנשימה.
   - ★ דום־לב.
4. **נזק לרקמות רכות וקשות**
   - ★ נזק לעור — כוויות.
   - ★ נזק לעצבים — שיתוקים.
   - ★ נזק לעצמות — שברים.
5. **התקף והתכווצויות**
הפרעות שיוצר הזרם במוח עלולות לגרום להתקפי התכווצויות עוויתיים של כל שרירי הגוף.
6. נפגע בהכרה שלקה במכת חשמל עלול לסבול מהתלונות והסימנים הבאים:
   - ★ אי־שקט.
   - ★ כאבי שרירים.
   - ★ שיתוק.
   - ★ הפרעות בראייה.

מה עליך לעשות?

1. **נתק את המגע בין גורם ההתחשמלות לבין הנפגע**
   - ★ עדיף לנתק את מקור הזרם.
   - ★ אם לא ניתן לעשות זאת, הרחק את הגורם המחשמל בעזרת עצם לא־מוליך (מקל עץ יבש, מוט עם ידית פלסטיק וכדומה).
2. **כבה והסר בגדים בוערים**
3. **החל בהחייאה**
   - א. פתח דרכי־אוויר.
   - ב. ודא נשימה ודופק.
   - ג. אם נדרש, בצע החייאה — הנשמה עם או ללא עיסוי.
4. **טפל בפצעי כוויה**
כסה את הכוויה בתחבושת סטרילית או בפיסת בד נקי.
5. **קבע שברים**
בגפיים ובצוואר.
6. **פנה בדחיפות לבית־חולים**
יש לפנות כל נפגע שספג מכת חשמל לבית־חולים, גם אם הוא לא איבד את ההכרה ונראה כאילו הוא סובל מפגיעה קלה בלבד: למכת חשמל עלולים להיות סיבוכים מאוחרים.

שים לב!

- ★ במקרים רבים שטח הכוויה החיצונית על־פני העור הוא קטן יחסית ועלול להטעות את המטפל, בעוד שלמעשה נגרם הרס נרחב של הרקמות שמתחת לעור, במסלול שבו עבר הזרם.
- ★ מכת חשמל, במיוחד ממתח גבוה, עלולה לגרום לשברים ופריקות של עצמות, לרבות חוליות עמוד־השידרה. הפגיעה נגרמת עקב כיווץ עוויתי של השרירים בעת מעבר הזרם בגוף, או כתוצאה מנפילה מגובה עקב ההתחשמלות.
נפגע כזה עלול לסבול משברים בגולגולת ובעמוד־השידרה הצווארי, ולפיכך יש לקבע את צווארו בהקדם האפשרי.

סיכום פרק 4

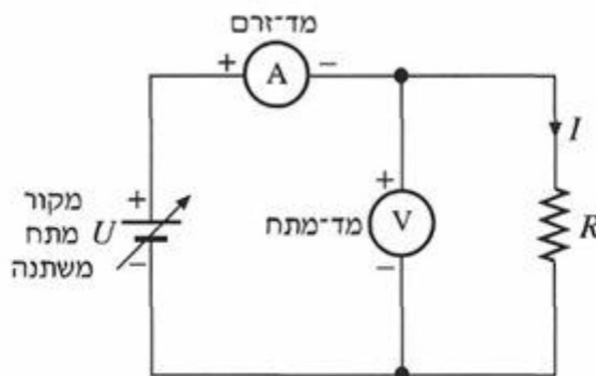
- מעגל חשמלי סגור (ובקיצור : מעגל חשמלי) הוא מערכת חשמלית, המהווה מסלול סגור לזרם אלקטרונים. המעגל כולל (לפחות) מקור מתח, המחובר לצרכן (נגד).
- כדי לאפשר את חיבור הצרכן – או את ניתוקו – מצרפים מתג למעגל החשמלי.
- אם לא זורם זרם במעגל, הרי שהמעגל פתוח.
- מקובל לסרטט מעגל חשמלי, באמצעות סמלים מוסכמים.
- סוגי נגדים : נגדי שכבה, נגדי פחם, נגדים מלופפי-תיל.
- גוף האדם הוא מוליך, אם כי לא מוליך מעולה. אם זרם עובר דרך גוף האדם, התוצאה עלולה להיות קטלנית.

5
חוק אום

5.1 התנגדות וחוק אום

בפרקים הקודמים הגדרנו את ההתנגדות של מוליך כיחס בין המתח על המוליך לזרם דרכו. כמו-כן למדנו, שההתנגדות של מוליך תלויה באורך המוליך, בשטח החתך שלו ובחומר שממנו עשוי המוליך (כלומר, בהתנגדות הסגולית). ראינו כי גם הטמפרטורה משפיעה על ההתנגדות.

עכשיו ברצוננו לבדוק אם ההתנגדות של מוליך – תלויה גם במתח שבין קצות המוליך, ואם היא תלויה, כתוצאה מכך, גם בעוצמת הזרם העובר במוליך. אפשרות נוספת, כמובן: למוליך יש התנגדות קבועה, שאינה תלויה במתח או בזרם. כדי לבדוק אפשרויות אלה, נתבונן במעגל שבאיור 5-1.



איור 5-1 מעגל חשמלי למדידת המתח על נגד והזרם דרכו

במעגל זה אפשר לשנות את מתח המקור (נניח כי המקור הוא סַפָּק, שאפשר לשנות את המתח שלו על-ידי סיבוב כפתור). הסימן המקובל של מקור מתח כזה הוא . כדי למדוד

את המתח על הנגד, חיברו במעגל מד מתח; וכדי למדוד את הזרם בנגד, חיברו במעגל מד זרם. לא נדון כאן בצורת החיבור של מכשירים אלה במעגל. כאן נציין כי מד המתח במעגל שבאיור 5-1 – מודד את המתח על הנגד; ומד הזרם מודד, למעשה, את הזרם בנגד.

עכשיו נשנה פעמים אחדות את מתח המקור, ובכל פעם נמדוד את המתח על הנגד ואת הזרם העובר דרכו. נסכם את תוצאות המדידות בטבלה:

מתח (V)	12	18	24	30	36	48
זרם (A)	0.5	0.75	1	1.25	1.5	2

טבלה 5-1 תוצאות המדידה של המתח על נגד והזרם דרכו

נחשב בכל פעם את היחס בין המתח על הנגד לבין הזרם דרכו:

$$\frac{24}{1} = 24 \qquad \frac{18}{0.75} = 24 \qquad \frac{12}{0.5} = 24$$

וכן הלאה.

אנו רואים כי בניסוי זה – היחס בין המתח על הנגד, לבין הזרם בנגד, הוא קבוע. כלומר, לנגד יש התנגדות קבועה, שערכה $R = 24\ \Omega$, והיא אינה משתנה – גם כאשר משנים את המתח על הנגד ואת הזרם דרכו (אנו מניחים שבניסוי זה – הטמפרטורה של הנגד אינה משתנה).

תוצאה זו, האומרת כי **קיים יחס קבוע בין המתח על המוליך לבין הזרם דרכו**, התגלתה על-ידי הפיזיקאי אום, והיא נקראת על שמו – **חוק אום**.

הביטוי המתימטי של חוק אום הוא

$$\frac{U}{I} = R \qquad (5\text{-}1)$$

כאשר R קבוע.

בדרך-כלל כותבים את **חוק אום** בצורה הזאת:

$$U = RI \qquad (5\text{-}2)$$

כאשר **R קבוע**.

רוב המוליכים, הנמצאים בשימוש, מקיימים את חוק אום, ולכן הם נקראים לפעמים **מוליכים אומיים**. חשוב להדגיש כי **לא** כל המוליכים מקיימים את חוק אום. במוליך, שאינו מקיים את חוק אום, היחס בין המתח על המוליך – לבין הזרם דרכו, אינו קבוע, אלא משתנה כאשר משנים את המתח והזרם.

מדוע האור נדלק מיד?

לפי חוק אום, כאשר מתח קבוע פועל על מוליך, זורם במוליך זרם קבוע, כלומר: מספר קבוע של אלקטרונים עוברים דרך שטח החתך של המוליך בכל יחידת זמן. באיזו מהירות נעים האלקטרונים במוליך?

אפשר להראות שבמוליך מעשי (תיל נחושת, למשל), מהירות האלקטרונים – הנעים בתנועה מכוּוֶנֶת –היא בדרך-כלל לא יותר מכמה עשיריות המילימטר בשנייה. זוהי מהירות קטנה למדי.

אילו היינו צריכים לחכות, עד שהאלקטרונים יגיעו מקצה אחד של המוליך לקצהו האחר, היינו ממתינים זמן רב להפעלתם של מכשירים חשמליים. לדוגמה, בפנס, המרחק בין נורת החשמל לבין מתג ההדלקה הוא כמה סנטימטרים, והיינו צריכים להמתין זמן ניכר מהרגע שהיינו מדליקים את האור, עד לרגע שהנורה הייתה מתחילה להאיר. ובשיחות טלפון בין-עירוניות – היינו צריכים להמתין חודשים אחדים עד שהאלקטרונים היו מגיעים לקצה השני של הקו, כלומר: עד שצליל החיוג היה נשמע שם.

והרי אנו יודעים כי האור נדלק מיד, וכי אנו שומעים מיד את דברי בן-שיחנו, אפילו כאשר הוא נמצא בארץ אחרת. כיצד קורה הדבר?

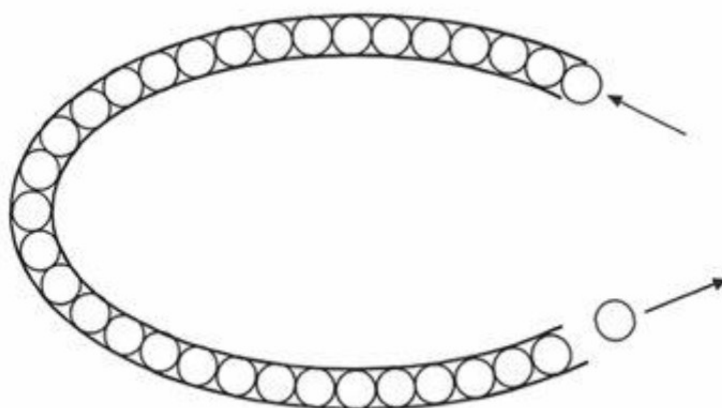
כאמור, כשמחברים מוליך למקור מתח, המקור מפעיל כוח על האלקטרונים החופשיים שבמוליך. אלקטרון חופשי, הקרוב להדק השלילי של המקור, גורם לדחיפת האלקטרונים החופשיים הסמוכים לו, ואלה גורמים לדחיפת האלקטרונים הסמוכים להם, וכן הלאה... וכן הלאה ...

הדחיפה הזאת עוברת במהירות עצומה (כמעט במהירות האור, כלומר: כמעט 300,000 קילומטרים בשנייה), וגורמת לפעולת האלקטרונים במכשירים השונים. לכן הנורה מאירה מיד, ואנו שומעים מיד את בן-שיחנו שבקצה השני של הטלפון. לכן פעולת האלקטרונים מתרחשת מיד, למרות התנועה האיטית של האלקטרונים במוליך.

נוכל להבין את התופעה בעזרת המחשה פשוטה. נחשוב על התיל המוליך כעל צינור חלול, ועל האלקטרונים כעל כדורים הממלאים את הצינור. צינור כזה, מלא כדורים, מתואר באיור 5-2. כאשר דוחפים פנימה כדור בקצה אחד של הצינור, כדור אחר נפלט מיד החוצה בקצה השני של הצינור. מה הסיבה לכך?

כשאנו דוחפים את הכדור שבקצה האחד, הוא דוחף מיד את הכדור הסמוך לו, וזה דוחף את הכדור שלידו, וכן הלאה – עד שנפלט הכדור שבקצה השני של הצינור. הכדור, שנדחף פנימה, אינו נע במהירות גדולה, אבל הדחיפה עוברת מהר מאוד מכדור לכדור, והשפעת הדחיפה מורגשת מיד בקצה השני של הצינור.

כך גם האלקטרונים. מהירותם אינה גדולה מאוד, אבל פעולתם מתרחשת מיד. עם זאת, יש הבדלים רבים בין האלקטרונים לבין הכדורים שבהמחשה זו.



איור 5-2 תנועת האלקטרונים במוליך ניתנת להמחשה על-ידי תנועת כדורים בצינור

חישובים בעזרת חוק אום

המשוואה $U = RI$ היא משוואה שימושית מאוד. נביא דוגמאות אחדות לחישובים כאלה.



דוגמה 5-1

המתח על גוף החימום של מכונת כביסה הוא 220 V. התנגדות גוף החימום היא 20 Ω. מהו הזרם הזורם בגוף החימום?

פתרון

נתון כי $U = 220\ \text{V}$, $R = 20\ \Omega$. נציב במשוואה (5-1) את הנתונים, ונקבל:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220\ \text{V}}{20\ \Omega} = 11\ \text{A}$$

הזרם בגוף החימום הוא 11 A.





דוגמה 5-2

גוף חימום של תנור חשמלי – עשוי מתיל כרום-ניקל. התנגדות גוף החימום היא 200 Ω. מה המתח על גוף החימום, כשהזרם דרכו הוא 2.5 A?

פתרון

נתון כי $R = 200\ \Omega$, $I = 2.5\ \text{A}$. נציב את הנתונים, ונקבל:

$$U = RI = 200 \times 2.5 = 500\ \text{V}$$

המתח על גוף החימום הוא 500 V.





דוגמה 5-3

המתח על נורה הוא 220 V, והזרם דרכה הוא 0.2 A. מהי התנגדות הנורה?

פתרון

נתון כי $U = 220\ \text{V}$, $I = 0.2\ \text{A}$. נציב את הנתונים במשוואה (5-1), ונקבל:

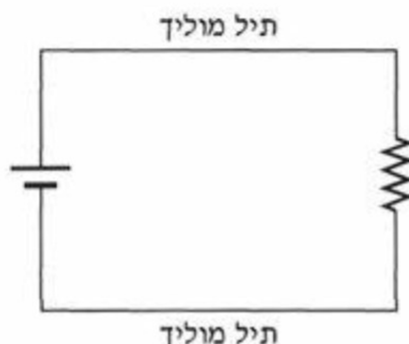
$$R = \frac{U}{I} = \frac{220\ \text{V}}{0.2\ \text{A}} = 1100\ \Omega$$

התנגדות הנורה היא 1100 Ω.



קצר ונתק

ראינו כי מעגל חשמלי כולל מקור מתח וצרכן. הזרם החשמלי זורם בתיל מוליך אחד (כלומר, בחוט חשמל) מהמקור לצרכן, ובתיל מוליך אחר – מהצרכן למקור, וכך נסגר המעגל החשמלי. מעגל כזה מתואר באיור 5-3.



איור 5-3 מעגל חשמלי הכולל מקור, צרכן ומוליכים

התיל המוליך עשוי נחושת, או מתכת אחרת, ומצופה בחומר מבודד. כבר למדנו כי הבידוד נועד למנוע התחשמלות של אדם, הנוגע בתיל המוליך. כמו-כן הוא נועד למנוע מגע בין שני התֵילִים שבמעגל.

לפעמים, כאשר החומר המבודד מתיישן ומתקלף, נוצר בכל זאת מגע בין התֵילִים המוליכים. מעגל חשמלי, שנוצר בו מגע כזה, מתואר באיור 5-4.



איור 5-4 מעגל חשמלי, שבו יש מגע בין התֵילִים

מדוע חשוב למנוע את המגע בין התֵילִים במעגל חשמלי?

בהמשך נלמד, כי כאשר יש מגע בין התֵילִים, רוב הזרם במעגל עובר מהמקור דרך נקודת המגע ודרך התֵילִים – וחוזר למקור, בלי לעבור דרך הצרכן. לתֵילִים יש התנגדות קטנה מאוד, ולפי חוק אום, הזרם המתקבל גדול מאוד. לזרם כזה קוראים **זרם קֶצֶר**, ולמצב כזה במעגל קוראים **קֶצֶר**.

למדנו שהזרם, העובר במוליך, גורם להתחממות המוליך. מאחר שזרם הקֶצֶר גדול מאוד, התֵילִים המוליכים יכולים להתחמם מאוד, ועלולה לפרוץ שריפה. כדי למנוע זאת, מכניסים למעגל נתיך. הנתיך גורם לנתק במעגל, כלומר: פותח את המעגל, כאשר הזרם גָדֵל מעל לרצוי.

שאלות חזרה

שאלה 5-1

קבע לגבי כל משפט, אם הוא נכון או לא – ונמק את קביעתך.

א. כל מוליך מקיים את חוק אום.

ב. שום מוליך אינו מקיים את חוק אום.

ג. אם מוליך מקיים את חוק אום, המתח על המוליך קבוע.

ד. אם מוליך מקיים את חוק אום, הזרם דרכו קבוע.

ה. אם מוליך מקיים את חוק אום, התנגדותו קבועה.

שאלה 5-2

סמן את התכונה של מוליך אומי.

א. המתח עליו קבוע.

ב. התנגדותו קבועה.

ג. הזרם דרכו קבוע.

ד. הוא אינו מציית לחוק אום.

שאלה 5-3

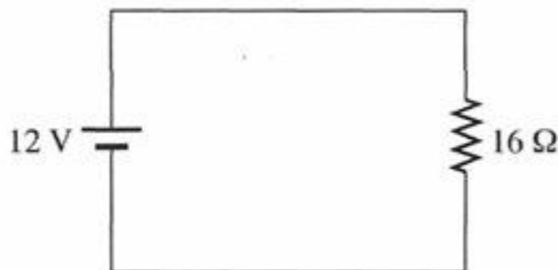
המתח על נורה הוא 220 V. מהו הזרם בנורה, אם התנגדותה 400 Ω?

שאלה 5-4

התנגדות תנור חשמלי היא 20 Ω, והזרם בתנור הוא 11 A. מהו המתח על התנור?

שאלה 5-5

מה הזרם בנגד, המחובר במעגל החשמלי שבאיור 5-5?



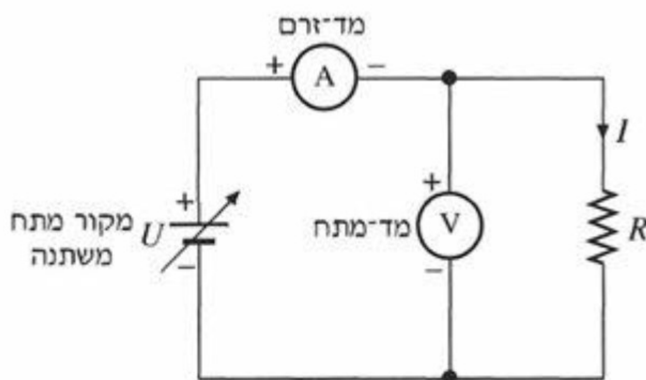
איור 5-5

שאלה 5-6

מלחם מחובר לרשת החשמל, והמתח עליו הוא 220 V. התנגדות המלחם היא 1,100 Ω. מהו הזרם במלחם?

5.2 תיאור גרפי של חוק אום

בסעיף הקודם תיארנו שיטה למדידת התנגדות של נגד: מחברים את הנגד למקור מתח, שהמתח שלו ניתן לשינוי. כל פעם שמשנים את מתח המקור, מודדים את המתח על הנגד ואת הזרם דרכו, ומחשבים את ההתנגדות. נחזור ונביא באיור 5-6 את המעגל, שבו נערכות המדידות ואת טבלת התוצאות.



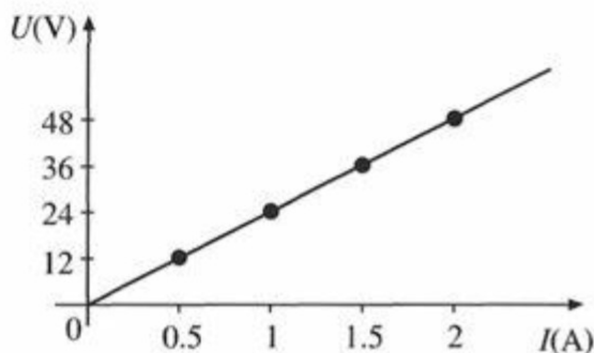
איור 5-6 מעגל למדידת המתח על נגד והזרם דרכו

מתח (V)	12	18	24	30	36	48
זרם (A)	0.5	0.75	1	1.25	1.5	2

טבלה 5-2 תוצאות המדידה של המתח על נגד והזרם דרכו

כדי לדעת אם הנגד הוא אומי (כלומר, אם הנגד מקיים את חוק אום), חילקנו את המתח בזרם בכל אחת מהמדידות, ובדקנו אם התוצאות זהות. כלומר, בדקנו אם ההתנגדות קבועה.

אפשר לבדוק אם נגד הוא אומי – גם בדרך אחרת: באמצעות גרף, המתאר את הקשר בין המתח על הנגד – לזרם דרכו. לפעמים דרך זו נוחה יותר; די להציץ בגרף, כדי לדעת אם הנגד הוא אומי או לא. גרף, המתאר את המתח בתלות בזרם, נקרא אופיין התנגדות. באיור 5-7 נתון אופיין התנגדות של נגד.



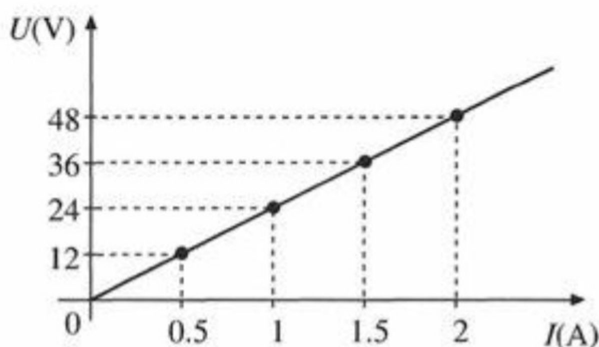
איור 5-7 אופיין התנגדות של נגד

למדנו כי משוואת קו ישר, העובר דרך הראשית של מערכת צירים, היא

$$y = kx$$

k הוא שיפוע הקו, והוא קבוע. קו כזה מתואר במערכת הצירים שבאיור 5-8.

בדוגמה 5-4 שלהלן נחשב את השיפוע של קו כזה, כלומר נמצא את ההתנגדות של נגד.



איור 5-8 קו ישר העובר דרך ראשית הצירים

באופן דומה, משוואת הקו הישר במערכת הצירים U-I (מתח-זרם), היא מהצורה

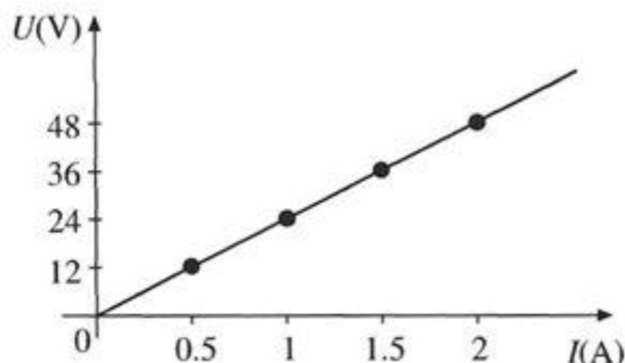
$$U = RI$$

כאשר השיפוע הקבוע של הקו מסומן הפעם באות R. אם נתבונן באופיין התנגדות של מוליך מסוים, ונראה כי הוא קו ישר העובר דרך הראשית. פירוש הדבר ש-R הוא קבוע. כלומר, ההתנגדות של המוליך הנדון היא קבועה. לכן זהו אופיין של נגד אומי. נגד, שאופיין ההתנגדות שלו הוא קו ישר, נקרא לפעמים **נגד ליניארי**, ובקיצור: **נגד**.



דוגמה 5-4

מהי התנגדות הנגד שאופיין ההתנגדות שלו נתון באיור 5-9?

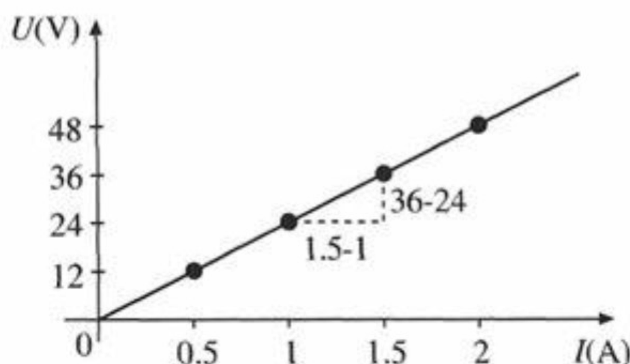


איור 5-9

פתרון

כדי לחשב את התנגדות הנגד, כשנתון אופיין ההתנגדות שלו, יש לבחור שתי נקודות על הגרף (כפי שמתואר באיור 5-10), ולחלק את הפרש המתחים בהפרש המתאים של הזרמים. כדי לקבל תוצאה נכונה, יש להקפיד על יחידות המתח והזרם. על-פי הגרף, נקבל כי התנגדות הנגד היא

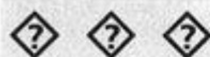
$$\frac{36\text{ V} - 24\text{ V}}{1.5\text{ A} - 1\text{ A}} = \frac{12\text{ V}}{0.5\text{ A}} = 24\frac{\text{V}}{\text{A}} = 24\,\Omega$$



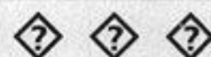
איור 5-10 חישוב ההתנגדות של נגד ליניארי



כפי שכבר אמרנו, לא כל החומרים, ואפילו לא כל המוליכים, מקיימים את חוק אום. חוק אום מתקיים בעיקר במתכות (וגם לגביהן יש לדאוג לטמפרטורה קבועה, כדי שיקיימו חוק זה). ההתנגדות של חומרים רבים בטבע ושל התקנים רבים, תלויה במתח שבין קצותיהם, וכתוצאה מכך - בזרם דרכם.

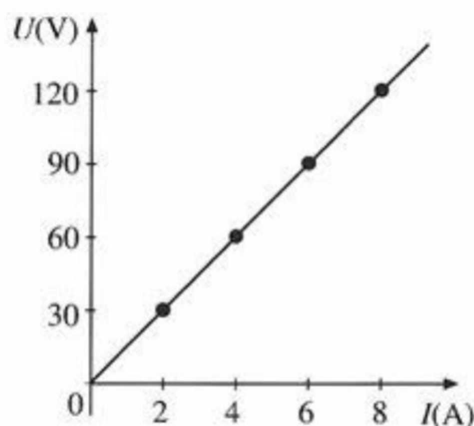


שאלות חזרה



שאלה 5-7

באיור 5-11 מתואר אופיין ההתנגדות של נגד. מהי התנגדות הנגד?



איור 5-11

שאלה 5-8

מדדו את המתח על נגד ואת הזרם דרכו. שינו את המתח, ושוב מדדו את הזרם, וכן הלאה. סרטט את אופיין ההתנגדות של הנגד, על-פי תוצאות המדידות שלהלן.

מתח (V)	28	21	14	7
זרם (A)	0.8	0.6	0.4	0.2

שאלה 5-9

סרטט את אופיין ההתנגדות של נגד, שהתנגדותו $50\ \Omega$. הנח כי המתח על הנגד הוא $100\ V$ לכל היותר.

שאלה 5-10

סמן את הטענה הנכונה (או הטענות הנכונות) לגבי התנגדות של נגד ליניארי.

א. התנגדות הנגד **<u>תגדל / תקטן</u>**, ככל שהמתח על הנגד יגדל.

ב. התנגדות הנגד **<u>תגדל / תקטן</u>**, ככל שהזרם בנגד יגדל.

ג. התנגדות הנגד אינה משתנה, גם אם משנים את המתח על הנגד.

ד. התנגדות הנגד גדלה בצורה ליניארית (כלומר, קו ישר משופע).

שאלה 5-11

א. נתון רכיב חשמלי, שזורם דרכו זרם, כשהמתח עליו הוא אפס. האם רכיב זה מקיים את חוק אום? נמק.

ב. נתון רכיב, שלא זורם בו זרם, והמתח עליו שונה מאפס במצב זה. האם רכיב זה מקיים את חוק אום?

ג. אופיין ההתנגדות של רכיב – אינו עובר דרך הראשית (הנקודה 0;0). האופיין הוא קו ישר. האם רכיב זה מקיים את חוק אום?

סיכום פרק 5

- חוק אום קובע כי קיים ישר יחס בין המתח על נגד לבין הזרם בנגד ($U = RI$), אם התנגדות הנגד קבועה, ואינה תלויה במתח על הנגד ובזרם בנגד (ואם מזניחים את השינוי בהתנגדות הנגד, המתחמם כתוצאה מהזרם דרכו).
- רוב המוליכים, הנמצאים בשימוש, מצייתים לחוק אום, והם נקראים **מוליכים אומיים**.
- יש להבדיל בין חוק אום לבין הגדרת ההתנגדות של מוליך, אף כי בשני המקרים מופיע אותו קשר.
- אופיין התנגדות מתאר את המתח כפונקציה של הזרם, ואופיין מוליכות מתאר את הזרם כפונקציה של המתח.
- לנגד, שהאופיין שלו הוא קו ישר, קוראים לפעמים **נגד ליניארי**.
- מוליך מציית לחוק אום, רק אם האופיין שלו – אופיין התנגדות או אופיין מוליכות – ליניארי ועובר דרך הראשית.
- חוק אום אינו חוק טבע כללי, ואינו חל על כל החומרים. חוק אום חל בעיקר על מתכות (אם ניתן להזניח את שינויי הטמפרטורה שלהן, כתוצאה מהזרם דרכן). יש מוליכים, שאינם מצייתים לחוק אום.

6

ההספק החשמלי

6.1 הגדרת ההספק

בפרקים הקודמים למדנו על חיבור נגד למקור מתח. נחזור ונתאר בקיצור מה קורה בעת חיבור כזה. ובכן, המתח בין הדקי המקור גורם לכך, שעל האלקטרונים החופשיים בנגד, המחובר למקור, פועל כוח חשמלי. אלקטרונים אלה נעים בנגד, רוכשים אנרגיה קינטית (של תנועה), ובמהלך תנועתם מתנגשים ביוני הסורג. כתוצאה מהתנגשויות אלה, הנגד מתחמם.

אנו רואים שבתהליך זה יש הפיכת אנרגיה מצורה אחת לצורה אחרת: אנרגיה חשמלית הופכת לחום; נוסף לכך יש בתהליך זה מעבר של אנרגיה: ממקור המתח אל הנגד. בחיי היום-יום אנו מכירים מקרים רבים, שבהם אנרגיה חשמלית הופכת לחום באמצעות זרם חשמלי. באיור 6-1 מתוארת דוגמה כזאת. באיור זה אנו רואים קומקום חשמלי, המשמש לחימום מים.



איור 6-1 קומקום חשמלי לחימום מים הוא התקן, שבו אנרגיה חשמלית הופכת לחום

הקומקום מחובר למקור מתח (למעשה, הקומקום מחובר, באמצעות שקע החשמל, לרשת החשמל). בגוף החימום של הקומקום – זורם זרם. כתוצאה מכך, גוף החימום מתחמם, והוא מחמם את המים שמסביבו. אם נדע את כמות המים שהתחממו, ונדע בכמה מעלות עלתה טמפרטורת המים, נוכל לחשב את כמות האנרגיה שהושקעה בחימום המים. אולם לעתים קרובות, כאשר אנו עוסקים בהפיכת אנרגיה חשמלית לחום, אנו מתעניינים לא רק בכמות האנרגיה המושקעת, אלא גם בזמן שנדרש לכמות זו של אנרגיה חשמלית להפוך לחום.

בדרך-כלל, הרתחת המים בקומקום נמשכת דקות אחדות. ברור שלא היינו קונים קומקום חשמלי, שהרתחת המים בו נמשכת זמן ארוך (למשל: שעה). אנו רואים אפוא כי למשך הזמן, הדרוש לחימום, יכולה להיות חשיבות רבה.

מה קורה אפוא בעת חימום מים בקומקום חשמלי? **אנרגיה הופכת את צורתה** – מאנרגיה חשמלית לחום; **אנרגיה עוברת ממקום למקום** – ממקור המתח למים המתחממים; מקור המתח **משקיע אנרגיה**; הקומקום החשמלי והמים **צורכים אנרגיה**.

נתעניין בהמשך בעיקר בשני גורמים: כמות האנרגיה המחליפה את צורתה, ומשך הזמן הדרוש לכך. גורמים אלה קובעים את קצב ההפיכה של אנרגיה מצורה אחת - לאנרגיה מצורה אחרת. לקצב זה קוראים **הֶסְפֵּק**. כלומר,

הספק הוא קצב הפיכת אנרגיה מצורה לצורה.
הספק מוגדר גם כקצב ביצוע עבודה, אך לא נדון כאן בהגדרה זו.

נבטא את ההספק באופן מפורט יותר:

$$\text{הספק} = \frac{\text{כמות האנרגיה המחליפה צורה}}{\text{משך הזמן שהאנרגיה מחליפה צורה}}$$

נסמן באות W את כמות האנרגיה המחליפה צורה; נסמן באות t את משך הזמן שהאנרגיה מחליפה צורה, ובאות P – את ההספק. נחליף במשוואה האחרונה את המלים באותיות, ונקבל כי ההספק נתון על-ידי

$$P = \frac{W}{t} \qquad (6\text{-}1)$$

P – הספק

W – אנרגיה

t – זמן



דוגמה 6-1

קומקום חשמלי הופך אנרגיה חשמלית של 360,000 ג'ול לחום – במשך 3 דקות. מהו הספק הקומקום?

פתרון

כמות האנרגיה שהחליפה צורה היא

$W =$ 360,000 ג'ול

משך הזמן, שהאנרגיה החליפה צורה, הוא 3 דקות. נבטא – במערכת היחידות SI – את הזמן בשניות:

$t =$ 180 שניות

והספק הקומקום הוא, לפי משוואה (6-1),

$$P = \frac{W}{t} = \frac{360,000\ J}{180\ s} = 2,000\frac{J}{s}$$



יחידות ההספק

בדוגמה 6-1 אפשר לראות כי ההספק נמדד ב- $\frac{J}{s}$. היחידה $\frac{J}{s}$ נקראת **ואט**, ומסמנים אותה באות **W**.[*] כלומר:

$$\text{W}=\frac{\text{J}}{\text{s}}$$

ואט = ג'ול / שנייה

אם-כן, הספק הקומקום שבדוגמה 6-1 הוא 2,000 W.

כשההספק גדול, נהוג למדוד אותו ביחידות **קילו-ואט** או **מגה-ואט**. קילו-ואט הוא אלף ואט (כשם שקילומטר הוא אלף מטר). קילו-ואט מסומן כך: kW. הקשר בין קילו-ואט לבין ואט הוא

$$1\ \text{kW} = 1,000\ \text{W}$$

[*] האות W מסמנת גם את יחידת ההספק ואט, וגם אנרגיה. לצורך הבחנה, מסומנת האנרגיה כאן באות עבה: **W**.

מגה-ואט הוא מיליון ואט. מגה-ואט מסומן כך : **MW**. הקשר בין מגה-ואט לבין ואט הוא

$$1\ \text{MW} = 1{,}000{,}000\ \text{W}$$

כוח-סוס

יחידת ההספק נקראת על שם ג'יימס ואט, מהנדס סקוטי, שהיה ממפתחי מכונת הקיטור. אנו מכירים עוד יחידות, הנקראות על שם אנשי מדע. למשל: יחידת המתח וולט נקראת על שם וולטה; יחידת הזרם נקראת על שם אמפר. יחידות מדידה נקראות לפעמים על שמם של אנשי מדע – כאות הוקרה על תרומתם להתפתחות המדע.

ההספק נמדד לפעמים ביחידה אחרת, הנקראת כוח-סוס. מה הקשר בין יחידת מדידה בחשמל לבין סוס?

ובכן, מספרים כי ואט, ששכלל את מכונת הקיטור, נשאל פעם כמה סוסים תוכל המכונה שלו להחליף. כך נולדה יחידת ההספק המתייחסת לסוסים, הלוא היא כוח-סוס. כוח-סוס אחד שווה ל- $\frac{3}{4}$ קילו-ואט בערך. יחידה זו משמשת עד היום בתעשיית המכוניות, ויצרני מכוניות מציינים את ההספקים של מנועי מכוניות ביחידות של כוח-סוס. באיור 6-2 מופיעה מכונית צרפתית, ששמה קשור בסוסים.



איור 6-2 מכונית דה-שבו (פירוש השם: שני סוסים)



דוגמה 6-2

נתונים שני קומקומים. הספק קומקום א הוא $P_1 = 2{,}000\ \mathrm{W}$, והספק קומקום ב הוא $P_2 = 1{,}000\ \mathrm{W}$. לכל קומקום מכניסים ליטר מים באותה טמפרטורה, וצריך לחמם את המים בשני הקומקומים לאותה טמפרטורה. האנרגיה W, שהושקעה בחימום המים בכל אחד מהקומקומים, היא 200,000 ג'ול. באיזה קומקום יגיעו המים מהר יותר לטמפרטורה הסופית?

פתרון

בשני הקומקומים יש אותה כמות מים, ויש לחמם את המים באותה מידה (כלומר, מאותה טמפרטורה התחלתית לאותה טמפרטורה סופית).

ההספק נתון על-ידי משוואה (6-1)

$$P = \frac{W}{t}$$

מכאן נקבל כי משך הזמן, הדרוש לחימום, נתון על-ידי

$$t = \frac{W}{P}$$

נתון כי $W = 200{,}000\ J$. בקומקום א – $P_1 = 2{,}000\ \mathrm{W}$ ולכן משך הזמן הדרוש לחימום המים בקומקום א הוא

$$t_1 = \frac{W}{P_1} = \frac{200{,}000}{2{,}000} = 100\ s$$

ובקומקום ב – משך הזמן הוא

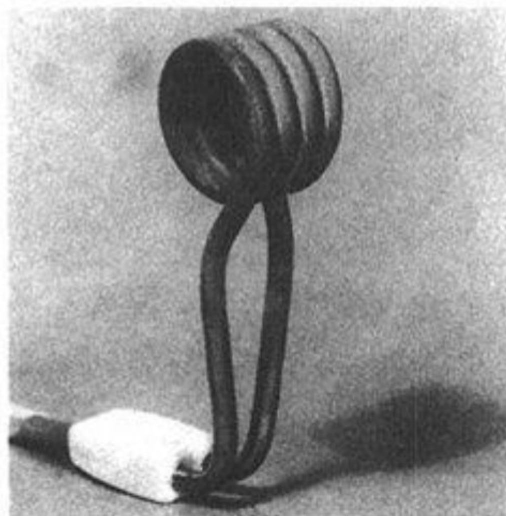
$$t_2 = \frac{W}{P_2} = \frac{200{,}000}{1{,}000} = 200\ s$$

לכן בקומקום א המים יגיעו לטמפרטורה הסופית, לפני המים בקומקום ב.

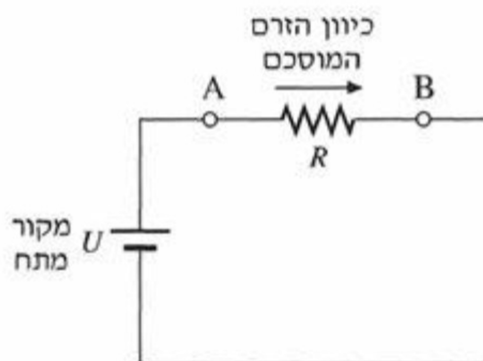
ניתן להראות כי מגיעים לאותה מסקנה לגבי כל כמות של אנרגיה W, שיש להשקיע בחימום המים בכל אחד מהקומקומים שבדוגמה זאת. לכן בקומקום א – שהספקו גדול יותר – המים יגיעו לטמפרטורה הסופית מהר יותר מהמים בקומקום ב.



הגדרנו את ההספק כקצב הפיכת אנרגיה מצורה אחת לצורה אחרת: $P = \frac{W}{t}$. הגדרה זו נכונה להספק מכל צורה, ולא רק להספק חשמלי. אבל אנו עוסקים, כידוע, בהספק חשמלי; לכן נלמד כיצד אפשר לבטא את ההספק החשמלי בדרך אחרת – באמצעות מתח וזרם. לשם כך נשתמש הפעם בדוגמה של כף חשמלית, המשמשת אף היא לחימום מים. תצלומה מופיע באיור 3-6א.



א - כף חשמלית



ב - המעגל החשמלי שבו נמצאת הכף החשמלית (הנגד R מייצג את הכף החשמלית)

איור 3-6

נניח שהמתח בין קצותיה של הכף החשמלית הוא U. אנו יודעים כי בגלל המתח הזה, האלקטרונים בכף החשמלית נעים מהקצה שבו הפוטנציאל נמוך, אל הקצה שבו הפוטנציאל גבוה. במעגל שבאיור 3-6ב ינועו האלקטרונים מהנקודה B, שהפוטנציאל שלה נמוך, אל הנקודה A, שהפוטנציאל שלה גבוה יותר.

אבל כזכור, כיוון הזרם המוסכם הפוך לכיוון תנועת האלקטרונים. לכן כיוון הזרם המוסכם בכף החשמלית הוא מהנקודה A לנקודה B.

נניח כי יחידת מטען חיובית עוברת מהנקודה A לנקודה B. כתוצאה מכך, האנרגיה החשמלית של יחידת המטען – קְטֵנָה. כלומר: בנקודה A, האנרגיה הפוטנציאלית של יחידת המטען החיובית גדולה יותר מאשר בנקודה B.

בכמה קטנה האנרגיה החשמלית של יחידת המטען בנקודה A, מזו שבנקודה B?

הפוטנציאל בנקודה מסוימת (למשל: הנקודה A) מוגדר כאנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של יחידת מטען באותה נקודה. לכן הפרש הפוטנציאלים (כלומר: המתח) בין שתי הנקודות A ו-B שווה להפרש בין האנרגיה הפוטנציאלית, שֶׁיֵּש ליחידת המטען בנקודה A, לבין האנרגיה הפוטנציאלית, שֶׁיֵּש לה בנקודה B.

הפרש הפוטנציאלים בין הנקודות A ו-B הוא U. מכאן שאם יחידת מטען אחת עוברת בין הנקודות A ו-B, כמות האנרגיה החשמלית של יחידת המטען בנקודה B, קטנה בשיעור $U \times 1$ (כלומר, בשיעור U) מזו שבנקודה A.

כאשר עוברות q יחידות מטען בין נקודות אלו, הפרש האנרגיה $\boldsymbol{W}$ - בין האנרגיה של יחידות מטען אלה בנקודה A, לבין האנרגיה שלהן בנקודה B – הוא Uq. כלומר:

$$\boldsymbol{W} = Uq$$

אנרגיה זו, $\boldsymbol{W}$, נמסרה לכף החשמלית והפכה לחום.

נשתמש בהגדרת ההספק, ונקבל כי הספק הכף החשמלית הוא

$$P = \frac{\boldsymbol{W}}{t} = \frac{Uq}{t} = U\frac{q}{t}$$

הביטוי $\frac{q}{t}$ כבר מוכר לנו. כזכור, עוצמת הזרם I מוגדרת כיחס בין המטען t לזמן – משוואה (2-7) – כלומר:

$$I = \frac{q}{t}$$

לכן נקבל כי ההספק נתון על-ידי

$$P = U\frac{q}{t} = UI \qquad (6\text{-}3)$$

כלומר, מצאנו כי

$$\boxed{P = UI} \qquad (6\text{-}4)$$

P – הספק [W]

U – מתח [V]

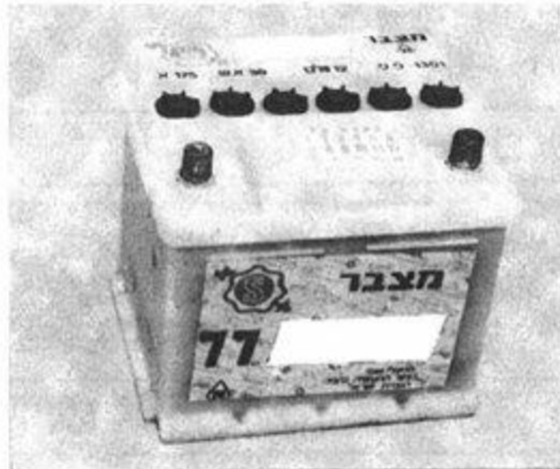
I – זרם [A]

ביטוי זה של ההספק ($P = UI$), שפיתחנו לגבי הכף החשמלית, נכון לגבי כל צרכן חשמלי, ואפילו לגבי מקור המתח עצמו, כפי שניווכח בהמשך לימודינו. אם-כן, אנו מקבלים כי ההספק של רכיב – שווה למכפלת המתח על הרכיב, בזרם העובר דרך הרכיב.



דוגמה 6-3

כאשר מתניעים מכונית בעזרת מתנע (סְטַרְטֶר, starter), המחובר למצבר (איור 6-4) של 12 V, זורם במתנע זרם של 200 A. חשב את ההספק המסופק למתנע.



איור 6-4 מצבר של מכונית

פתרון

– המתח על המתנע הוא $U = 12\text{ V}$.

– הזרם במתנע הוא $I = 200\text{ A}$.

והספק המתנע הוא, לפי משוואה (6-2),

$$P = UI = 12 \times 200 = 2{,}400\text{ W}$$



כאמור, משוואת ההספק, $P = IU$, נכונה לכל רכיב במעגל החשמלי. אם הרכיב הוא נגד, הרי שהוא מקיים את חוק אום, כלומר: $U = RI$ (R קבוע). נציב במשוואת ההספק את הביטוי של U מחוק אום, ונקבל:

$$P = IU = I \cdot IR = I^2R \qquad (6\text{-}5)$$

כלומר, אם בנגד, שהתנגדותו R, זורם זרם I, הספק הנגד נתון על-ידי

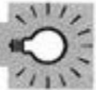
$$P = I^2R$$

ומכאן:

כלומר,

$$I^2 = \frac{P}{R}$$

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} \qquad (6\text{-}6)$$



דוגמה 6-4

ההספק של דוד חשמלי הוא 2,200 W. התנגדות גוף החימום של הדוד החם היא 20 Ω. מהו הזרם בגוף החימום?

פתרון

- הספק הדוד הוא $P = 2{,}200\ \text{W}$.
- התנגדות גוף החימום היא $R = 20\ \Omega$.

נרשום את המשוואה $P = RI^2$, משוואה (6-5),בצורה הנתונה במשוואה (6-6):

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}}$$

ונקבל כי

$$I = \sqrt{\frac{2{,}200}{20}} = \sqrt{110} = 10.5\ \text{A}$$

הזרם בגוף החימום הוא 10.5 A.



הלחמה וריתוך

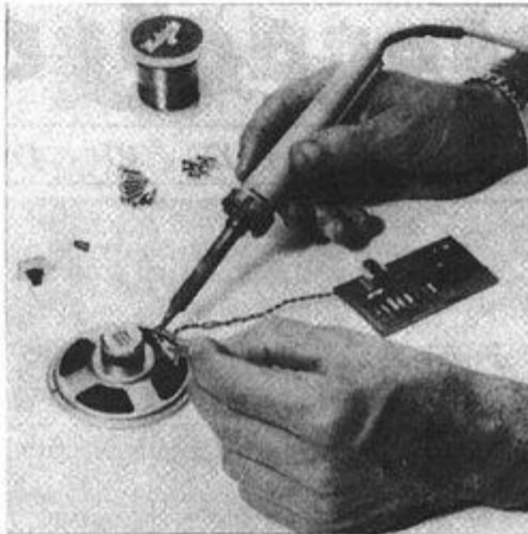
כשבונים מעגל חשמלי, צריך – לעתים קרובות – לחבר שני מוליכים מתכתיים זה לזה. כשמרכיבים מכונית, יש לחבר שני חלקי מתכת זה לזה. אלה רק שתי דוגמאות לצורך בחיבור קבוע של שתי מתכות זו לזו.

אחת השיטות לחיבור מוליכים במעגל חשמלי, היא ההלחמה. לשם כך משתמשים במלחם ובמוליך נוסף, העשוי בדרך-כלל בדיל. כדי להלחים את המוליכים, מקרבים אותם זה לזה, ומקרבים את הבדיל לנקודת החיבור; מחממים את המלחם, ומקרבים אותו אל הבדיל; המלחם מתיך את הבדיל בנקודת החיבור. לאחר שהבדיל מתקרר

לטמפרטורת החדר, מתקבל חיבור קבוע של המוליכים – באמצעות הבדיל. באיור 6-5 מתוארת הלחמה.

כיצד מחממים את המלחם? המלחם עשוי מוליך מתכתי וידית העשויה מחומר מבודד. מחברים את המלחם למקור מתח; במוליך המתכתי זורם זרם, והמוליך צורך הספק. כלומר, בכל שנייה עוברת במוליך אנרגיה חשמלית. אנרגיה זו הופכת לחום, והמלחם מתחמם.

בריתוך אין משתמשים במתכת נוספת, אלא מחממים את שתי המתכות שרוצים לחבר – עד שהן ניתכות. לאחר שהמתכות מתקררות, הן מחוברות ביניהן באופן קבוע.

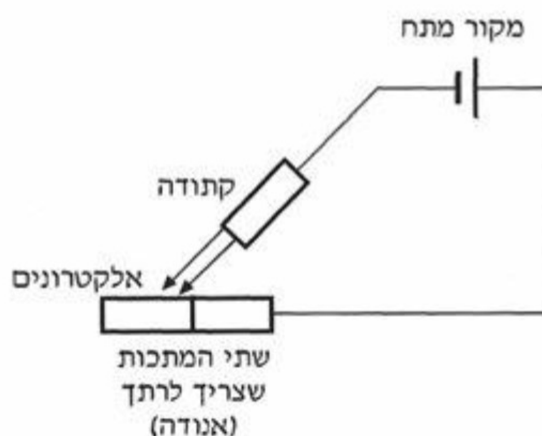


איור 6-5 הלחמה

קיימות שיטות שונות של ריתוך, ואחת מהן היא הריתוך החשמלי. למכשיר הריתוך יש אנודה וקתודה (בדומה לשפופרת הקרן הקתודית שבפרק 2), המחוברות למקור מתח. באיור 6-6ב מובא תרשים של מכשיר ריתוך, ובאיור 6-6א - צילום של מכשיר כזה.



א - צילום של מכשיר ריתוך



ב - צורה כללית של מכשיר ריתוך

איור 6-6 ריתוך

הקתודה היא מוט דק, המחובר להדק השלילי של מקור המתח. האנודה מחוברת להדק החיובי, והיא מורכבת משני חלקי המתכת, שאותה רוצים לרתך. חלקים אלה קרובים זה לזה (ולפעמים נוגעים זה בזה). כתוצאה מהמתח בין האנודה לקתודה, עוזבים אלקטרונים רבים את המוט הדק, ופוגעים באיזור המגע של חלקי המתכת. כתוצאה מכך מתחממות המתכות, עד שהן ניתכות.

כתוצאה מהמתח בין האנודה לקתודה של מכשיר הריתוך, נוצר – למעשה – ניצוץ חשמלי ממושך, ומתקבל אור מְסַנְוֵר, המסוכן לעיניים. משום כך יש להשתמש בקסדת מגן בשעת ריתוך.

קיבלנו כבר ביטוי אחד של ההספק בנגד ($P = RI^2$), באמצעות משוואת ההספק ($P = UI$) וחוק אום. נמצא עכשיו ביטוי נוסף של ההספק בנגד. לשם כך נרשום את חוק אום בצורה

$$I = \frac{U}{R} \qquad (R \text{ קבוע})$$

נציב במשוואת ההספק, $P = UI$, את הביטוי של I מחוק אום, ונקבל:

$$P = UI = U\frac{U}{R} = \frac{U \cdot U}{R} = \frac{U^2}{R}$$

כלומר, אם על נגד – שהתנגדותו R – המתח הוא U, הספק הנגד נתון על-ידי

$$P = \frac{U^2}{R} \qquad (6\text{-}7)$$

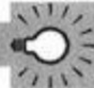
אם יודעים את המתח על נגד ואת הספק הנגד, ניתן לחשב את התנגדות הנגד. ניווכח בכך בדוגמה 6-5 שלהלן. אך לפני נציין כי על נורה רשום הספק ומתח, למשל: 60 W, 230 V. באיור 6-7 מופיע צילום של נורה.



איור 6-7 נורה חשמלית

פירושו של רישום זה הוא, שכאשר זורם זרם בנורה עקב מתח של 230 V, הספק הנורה הוא 60 W. כאמור, על סמך נתונים אלה, ניתן לחשב את התנגדות הנורה, כשהיא מחוברת למתח זה.

המתח וההספק אינם רשומים רק על נורות, אלא על התקנים ומכשירים חשמליים שונים (מקלט טלוויזיה, מערכת סטריאו, מחשב ביתי, מגהץ, תנור חשמלי ועוד).



דוגמה 6-5

מה התנגדות הנורה, המתוארת באיור 6-7, כשהיא פועלת במתח הנתון באיור?

פתרון

אנו יודעים כי כאשר המתח על הנורה הוא $U = 230$ V, הספק הנורה הוא $P = 60$ W.
ההספק נתון על-ידי משוואה (6-7):

$$P = \frac{U^2}{R}$$

ומכאן נקבל כי

$$R = \frac{U^2}{P}$$

נציב את הנתונים, ונקבל:

$$R = \frac{230^2}{60} = \frac{52{,}900}{60} = 881.7\ \Omega$$

התנגדות הנורה, כשהיא פועלת, היא 881.7 Ω.



שאלות חזרה

שאלה 6-1

השלם: הספק הוא קצב שינוי של ________.

שאלה 6-2

בכל שנייה הופכת אנרגיה חשמלית של 500 J – לחום. סמן את כל המשפטים הנכונים לגבי תהליך זה.

א. ככל שהתהליך נמשך זמן רב יותר, ההספק גדול יותר.

ב. ככל שהתהליך נמשך זמן קצר יותר, ההספק גדול יותר.

ג. ההספק אינו תלוי במשך הזמן של התהליך.

ד. ההספק הוא 500 W.

ה. ההספק הוא $\frac{1}{500}$ W.

ו. ההספק הוא 500 J.

ז. ההספק הוא $\frac{1}{500}$ J.

שאלה 6-3

סמן את המשוואה הנכונה (P - הספק; W - אנרגיה; t - זמן)

א. $P = Wt$ ב. $P = \frac{t}{W}$ ג. $P = \frac{W}{t}$ ד. $P = \frac{1}{Wt}$

שאלה 6-4

מדיח כלים צורך אנרגיה של 2,000 גיול במשך שנייה. מה הספק המדיח?

שאלה 6-5

מאוורר צורך אנרגיה של 30,000 גיול בדקה. מה הספק המאוורר?

שאלה 6-6

מערכת סטריאו צורכת 180,000 גיול בשעה. מה הספק המערכת?

שאלה 6-7

כמה אנרגיה מושקעת בנורה של 100 W, המאירה במשך שעתיים?

שאלה 6-8

הרתחת מים בקומקום חשמלי מסוים – נמשכת דקה וחצי. כדי להרתיח את המים יש להשקיע אנרגיה של 150,000 J. מה הספק הקומקום?

שאלה 6-9

נתונים שני דוודים חשמליים. דוד א פעל במשך זמן רב יותר מדוד ב, אך שני הדוודים צרכו אותה כמות אנרגיה. לאיזה משני הדוודים יש הספק גדול יותר? נמק.

שאלה 6-10

שני תנורים חשמליים פועלים במשך אותו זמן. לתנור, הצורך אנרגיה רבה יותר במשך זמן זה,

א. יש הספק גדול יותר.

ב. יש הספק קטן יותר.

ג. יש אותו הספק כמו לתנור השני.

שאלה 6-11

המתח הגורם לפעולת מכונת גילוח חשמלית, הוא 12 V. ההספק של מכונה זו, הוא 3 W. סמן את המשפטים הנכונים לגבי מכונת גילוח זאת.

א. התנגדות מכונת הגילוח בעת פעולתה היא 4 Ω.

ב. הזרם במכונת הגילוח הוא 0.25 A.

ג. מכונת הגילוח צורכת אנרגיה של 3 J בכל שנייה.

ד. בכל 3 שניות, מכונת הגילוח צורכת 1 J.

שאלה 6-12

סמן את ההספק הגדול ביותר מבין ההספקים הבאים:

199,000 W ; 201 kW ; 0.2 MW

שאלה 6-13

נורה צורכת 720,000 J במשך שעתיים, ואילו מקלט טלוויזיה צורך 24,000 J במשך 5 דקות. למי מהם יש הספק גדול יותר?

שאלה 6-14

ההספק של מחשב אישי הוא 50 W, וההספק של תנור חימום הוא 2 kW.

מה סכום ההספקים של שני מכשירים אלה?

שאלה 6-15

המתח הגורם לפעולת מערכת סטריאו הוא 220 V, והזרם במערכת הוא 0.4 A. מה הספק המערכת?

שאלה 6-16

ההספק של נורת להט הוא 100 W. המתח על הנורה הוא 230 V. מה הזרם בנורה?

שאלה 6-17

נורת הלוגן מחוברת לרשת החשמל. הספק הנורה הוא 500 W. מה המתח על הנורה, אם הזרם בה הוא 2.2 A ?

שאלה 6-18

על נורה רשום: 40 W / 230 V . מה התנגדות הנורה כשהיא פועלת?

שאלה 6-19

הזרם במלחם הוא 0.15 A התנגדות המלחם (כשזורם בו זרם זה) היא 1,600 Ω. מה הספק המלחם?

שאלה 6-20

נתונים שני תנורים חשמליים. התנגדות תנור א (כשהוא פועל) היא 15 Ω, והתנגדות תנור ב (כשהוא פועל) היא 10 Ω.

א. נתון כי המתח על שני התנורים הוא 220 V. חשב את ההספק של כל תנור.

ב. נתון כי הזרם בכל תנור הוא 12 A (אך המתח עליהם שונה). חשב עכשיו את ההספק של כל תנור.

שאלה 6-21

"ככל שההתנגדות גדולה יותר, ההספק גדול יותר".

האם טענה זו נכונה תמיד? לפעמים? אף פעם? נמק את תשובתך.

6.2 צריכת אנרגיה חשמלית ויחידות אנרגיה שימושיות

אם ידוע ההספק החשמלי P של צרכן, ניתן לדעת כמה אנרגיה חשמלית נצרכה על-ידי הצרכן במשך זמן t. לשם כך נשתמש במשוואת ההספק (6-1):

$$P = \frac{W}{t}$$

ומכאן נקבל כי האנרגיה החשמלית הנצרכת – נתונה על-ידי

$$W = Pt$$

ואם הצרכן – שהמתח עליו הוא U, והזרם דרכו הוא I – מקיים את חוק אום, נקבל – לפי משוואה (6-7) – כי

$$P = \frac{U^2}{R}$$

וכן – לפי משוואה (6-5) – נקבל כי

$$P = I^2 R$$

ומכאן נקבל:

$$W = Pt = \frac{U^2}{R}t = I^2 Rt \qquad (6\text{-}8)$$

לפעמים נוח לבטא את יחידת האנרגיה החשמלית באמצעות יחידת הספק ויחידת זמן. יחידת האנרגיה, המתקבלת במקרה כזה, היא ואט-שנייה (Ws). יחידה זו היא קטנה, ואינה נוחה לשימוש.

להתקני החשמל הביתיים יש בדרך-כלל הספק של עשרות, מאות ואפילו אלפי ואט. התקנים אלה פועלים במשך שעות רצופות (אלפי שניות). לכן מקובל למדוד את צריכת האנרגיה החשמלית – ביחידות של קילו-ואט שעה (kWh), ובקיצור: **קוט״ש** או **קו״ש**. נסביר סימון זה.

האות h היא האות הראשונה במלה hour (שעה, כלומר: 3,600 שניות). האות k מייצגת אלף, כפי שלמדנו. מכאן נקבל כי

$$1\ \text{kWh} = 1{,}000\ \text{W} \times 3{,}600\ \text{s} = 3{,}600{,}000\ \text{Ws} = 3{,}600{,}000\ \text{J}$$

כלומר, קילו-ואט שעה שווה לשלושה מיליון ושש-מאות אלף ג'ול.

יחידה מקובלת נוספת של אנרגיה היא MWh (מגה-ואט שעה), כלומר: מיליון ואט שעה:

$$1\ \text{MWh} = 1{,}000\ \text{kWh} = 3{,}600{,}000{,}000\ \text{J}$$



דוגמה 6-6

ההספק של תנור חשמלי הוא 1.5 kW. מה כמות האנרגיה החשמלית, שהתנור צורך במשך שעתיים? רשום את התשובה ביחידות ג'ול וביחידות קוט"ש.

פתרון

הספק התנור הוא $P = 1.5\ \text{kW} = 1{,}500\ \text{W}$.
משך הזמן הוא שעתיים (2h), כלומר: 7,200 שניות (7,200 s).

האנרגיה הנצרכת, ביחידות ג'ול, היא:

$$\boldsymbol{W} = 1{,}500\ \text{W} \times 7{,}200\ \text{s} = 10{,}800{,}000\ \text{J}$$

וביחידות קוט"ש נקבל:

$$\boldsymbol{W} = 1.5\ \text{kW} \times 2\text{h} = 3\ \text{kWh}$$

האנרגיה, שהתנור צורך במשך שעתיים, היא 3 קוט"ש.



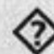
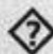
הנה הספקים אופייניים של מכשירים והתקנים שונים. (ברור כי ייתכנו גם ערכים שונים מאלה הרשומים כאן.)

וידיאו	30 W	מערכת סטריאו	100 W
מאוורר	52 W	מקלט טלוויזיה	150 W
מדיח כלים	1.6 kW	נורה פלואורסצנטית	40 W
מחשב ביתי	90 W	נורת הלוגן	500 W
מחשב כיס	0.0003 W	נורת להט	60 W
מיקרוגל	1.4 kW	רדיו-טייפ	15 W
מלחם	25 W	תנור חשמלי	3,000 W

תחנות-הכוח הגדולות מייצרות חשמל בהספקים גדולים ביותר. למשל, תחנת-הכוח רוטנברג שבאשקלון – כוללת שתי יחידות, שכל אחת מהן מייצרת חשמל בהספק של 550 MW.

שאלות חזרה

שאלה 6-22

א. נורה מאירה שעתיים ברציפות. הספק הנורה הוא 75 W. חשב – ביחידות ג׳ול – את האנרגיה, שהנורה צורכת במשך זמן זה.

ב. חשב את האנרגיה ביחידות kWh.

שאלה 6-23

הספק תנור הוא 2 kW. התנור פעל במשך 5 שעות. חשב – ביחידות kWh – את האנרגיה, שצרך התנור במשך זמן זה.

שאלה 6-24

״חברת החשמל בונה תחנת-כוח, המספקת 100 מגה-ואט.״

א. מה הספק התחנה?

ב. מה כמות האנרגיה – ביחידות ג׳ול – שהתחנה מספקת בשעה?

ג. בטא את האנרגיה ביחידות MWh.

שאלה 6-25

חשב – ביחידות ג׳ול – את האנרגיה, הנצרכת על-ידי כל אחד מהמכשירים הבאים, המחוברים לרשת החשמל (220 V).

שם המכשיר	התנגדות המכשיר	משך הפעולה של המכשיר
מלחם	1,600 Ω	שעתיים
נורה	600 Ω	שעה
תנור	15 Ω	10 דקות

שאלה 6-26

השלם:

א. Ws היא יחידת ________ .

ב. kWh היא יחידת ________ .

ג. kW היא יחידת ________ .

ד. 1 MWh גדול פי ______ מ-1 kWh.

ה. 1 kWh גדול פי ________ מ-1 J.

סיכום פרק 6

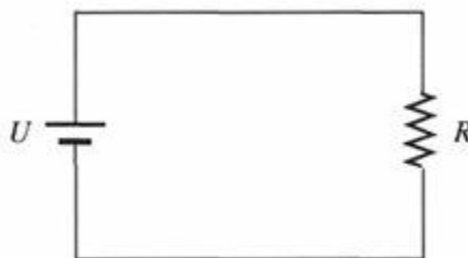
- ההספק P הוא קצב ביצוע עבודה, או קצב הפיכת אנרגיה מצורה אחת לצורה אחרת. אם הֶתקן מבצע עבודה W במשך זמן t, הספקו הוא $P=\frac{W}{t}$. יחידת ההספק היא וָט אחד (ג'ול לשנייה).
- הספק הצרכן שווה למכפלת המתח על הצרכן – בזרם העובר דרך הצרכן: $P = UI$. משוואה זו חלה על כל רכיב במעגל, כולל מקור מתח. אם צרכן מקיים את חוק אום, הספק הצרכן נתון גם על-ידי $P=I^2R=\frac{U^2}{R}$.
- קילו-ואט שעה הוא יחידת אנרגיה: הספק של קילו-ואט (1,000 W) – במשך שעה, כלומר: kWh .

  מגה-ואט שעה: הספק של מגה-ואט (מיליון ואט) – במשך שעה, כלומר: MWh .
- להתקני החשמל הביתיים יש הספק של עשרות, מאות ואפילו אלפי ואט. מקובל למדוד את צריכת האנרגיה החשמלית הביתית ביחידות של קילו-ואט שעה.

7

חוקי קירכהוף

באיור 7-1 מתואר מעגל חשמלי, כדוגמת המעגלים שבהם עסקנו בפרקים הקודמים. מעגל זה מכיל מקור מתח אחד ונגד אחד. כדי לחשב את המתח על הנגד, את הזרם דרך הנגד, או את התנגדות הנגד, השתמשנו בחוק אום. כלומר, אם ידועים הערכים של שניים מתוך שלושת הגדלים - מתח, זרם והתנגדות - נוכל לחשב את הגודל השלישי.



איור 7-1 מעגל המכיל מקור מתח ונגד

אם נדע את שלושת הגדלים האלה, נוכל לחשב גודל נוסף - ההספק. אם נדע את ארבעת הגדלים האלה, נאמר ש**פתרנו** את המעגל. אך לפעמים נסתפק בידיעת המתח, הזרם וההתנגדות במעגל, כדי לומר כי **פתרנו** את המעגל.

לא כל המעגלים פשוטים כמו המעגל שאיור 7-1. יש מעגלים, המכילים כמה מקורות מתח וכמה נגדים. כאשר מנסים לפתור מעגלים כאלה, מתברר שאי-אפשר לפתור אותם בעזרת חוק אום בלבד, אלא יש להשתמש בחוקים נוספים.

בפרק זה נלמד שני חוקים, שיעזרו לנו לפתור מעגלים, המכילים כמה מקורות מתח ונגדים. חוקים אלה נקראים **חוקי קירכהוף**, על שם המדען שניסח אותם לראשונה.

גוסטב רוברט קירכהוף

(1887-1824)



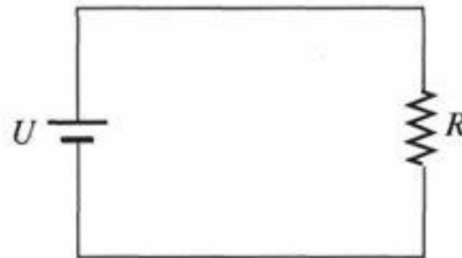
קירכהוף היה פיזיקאי גרמני, שהגיע להישגים חשובים בתחומים שונים של הפיזיקה. את שני החוקים בחשמל, הנקראים על שמו, ניסח כבר בגיל 23, כשהיה בראשית דרכו המדעית. גם את תואר הדוקטור שלו קיבל באותה שנה.

די היה בשני החוקים האלה, המשמשים לפתרון מעגלים חשמליים, כדי להביא לקירכהוף כבוד רב, אבל חוקים אלה היו רק חלק קטן מהישגיו. קירכהוף עסק גם בתחומים אחרים בפיזיקה, ועיקר הישגיו היו בעבודתו החלוצית בנושאים הקשורים בקרינה. ואמנם קיים חוק נוסף, שנקרא חוק קירכהוף, והוא עוסק בקרינה.

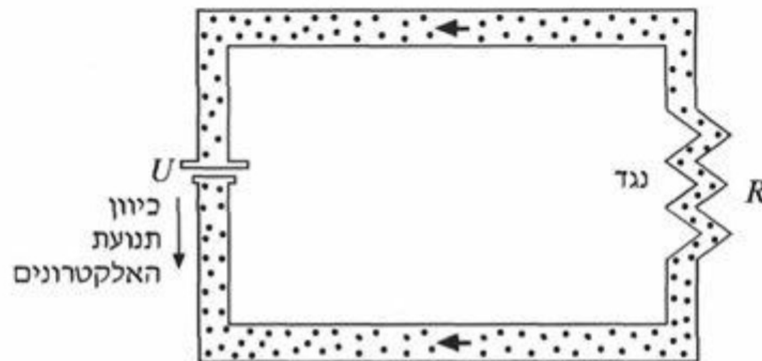
נוסף לכך היה קירכהוף שותף לגילוי שני יסודות כימיים חדשים, ותרם לחקר ההרכב של השמש.

7.1 חוק הזרמים של קירכהוף

נחזור ונתבונן במעגל, המכיל מקור אחד ונגד אחד. מעגל זה מופיע שוב באיור 7-2. תנועת האלקטרונים במעגל זה מתוארת באיור 7-3. האלקטרונים באיור זה מיוצגים על-ידי נקודות, והנגד מסומן על-ידי הגדלה של סימון הנגד.



איור 7-2 מעגל המכיל מקור מתח ונגד

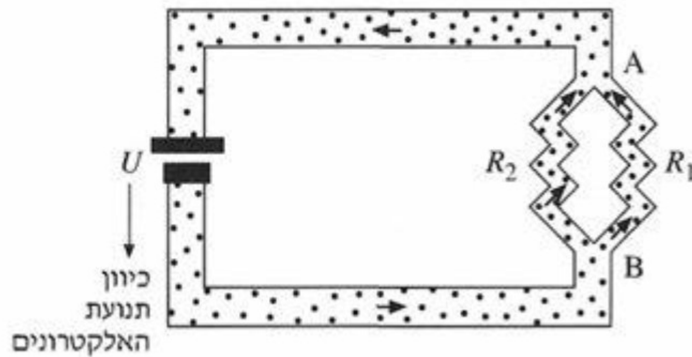


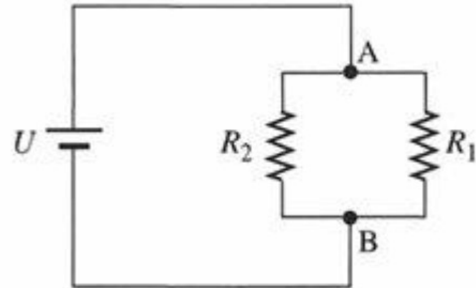
איור 7-3 תנועת האלקטרונים במעגל שלמעלה

כאמור, האלקטרונים נעים במעגל מההדק השלילי להדק החיובי, וכך גם מתואר במעגל שבאיור 7-3. האלקטרונים שם נעים מההדק השלילי של מקור המתח, דרך המוליך התחתון, משם הם ממשיכים לנוע דרך הנגד ודרך המוליך העליון, ומשם - לעבר ההדק החיובי של מקור המתח. כיוון תנועת האלקטרונים מסומן על-ידי חִצִים. כאמור, **כיוון הזרם המוסכם הפוך לכיוון תנועת האלקטרונים**.

צומת במעגל חשמלי

עכשיו נתבונן במעגל חשמלי, המכיל מקור מתח ושני נגדים, R_1 ו-R_2, כפי שמתואר באיור 7-4. הנגדים מחוברים – באמצעות מוליכים – למקור המתח. שתי נקודות החיבור של הנגדים למוליכים – הן A ו-B.



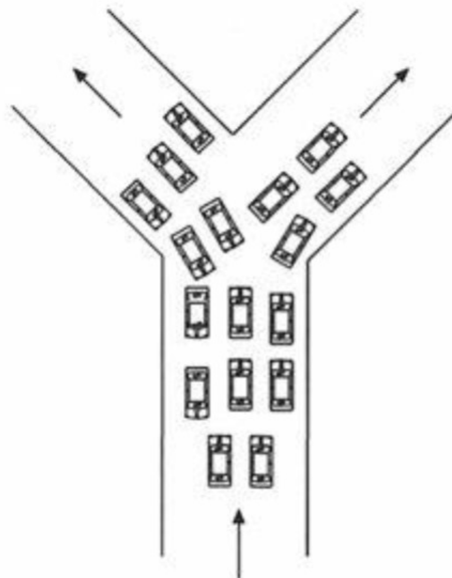


איור 7-4
מעגל שבו הזרם מתפצל בין שני נגדים

איור 7-5
תנועת האלקטרונים במעגל שמימין

באיור 7-5 מתוארת תנועת האלקטרונים במעגל שבאיור 7-4. נניח כי קבוצת אלקטרונים מגיעה לנקודה B. כיצד ימשיכו האלקטרונים לנוע? דרך הנגד R_1, דרך הנגד R_2, או דרך שני הנגדים?

כדי לנתח את תנועת האלקטרונים בנקודה B, ניעזר בדוגמה המוכרת לכולנו: מכוניות הנעות בכביש ונכנסות לצומת (איור 7-6). כשמכונית מגיעה לצומת, היא יכולה לפנות ימינה או שמאלה.



איור 7-6 מכוניות נכנסות לצומת ויוצאות ממנו

נניח כי אין "פקקים" בצומת. במקרה זה – מספר המכוניות הנכנסות לצומת בכל יחידת זמן, שווה למספר המכוניות היוצאות מהצומת באותה יחידת זמן.

נחזור לאיורים 7-4 ו-7-5. בדומה לצומת בכביש, הנקודה B היא **צומת** במעגל, כי חלק מהאלקטרונים יכולים להמשיך לנוע מנקודה זו דרך הנגד R_1, והחלק האחר – דרך הנגד R_2. בצומת עצמו לא מצטברים אלקטרונים. כלומר, כל האלקטרונים המגיעים לצומת ביחידת זמן, יוצאים מהצומת במשך אותה יחידת זמן, ואין "פקקים" בצומת.

נמשיך את ההשוואה בין מכוניות לאלקטרונים. מכוניות אינן נוצרות על הכביש או בצומת. גם האלקטרונים אינם נוצרים במוליך או בצומת.

ראינו אפוא כי

א. אלקטרונים אינם מצטברים בצומת;

ב. אלקטרונים אינם נוצרים בצומת.

משתי עובדות אלה נסיק כי

מספר האלקטרונים, היוצאים מהצומת ביחידת זמן, שווה למספר האלקטרונים, הנכנסים לצומת באותה יחידת זמן.

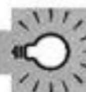
ראינו כי הנקודה B באיורים 7-4 ו-7-5 היא צומת במעגל. נסתכל עכשיו בנקודה A שבאיורים אלה. בנקודה זו מתכנסים האלקטרונים מהנגד R_1 ומהנגד R_2. משם ממשיכים האלקטרונים לנוע דרך המוליך, לעבר ההדק החיובי של מקור המתח.

גם הנקודה A היא צומת. בצומת מתכנסים, או מתפצלים, שני זרמים לפחות. באופן כללי, צומת הוא נקודה במעגל, שבה נפגשים לפחות שלושה רכיבים של המעגל (הרכיבים יכולים להיות מקור מתח, נגד, מוליך, מתג או רכיבים אחרים), כך שהדק אחד של כל אחד מהרכיבים – מחובר לצומת.

ראינו כי מספר האלקטרונים, היוצאים מהצומת ביחידת זמן, שווה למספר האלקטרונים, הנכנסים לצומת באותה יחידת זמן. כזכור, עוצמת הזרם (ובקיצור: הזרם) מוגדרת כסכום המטענים, העוברים ביחידת זמן דרך חתך של מוליך. מכאן נקבל כי

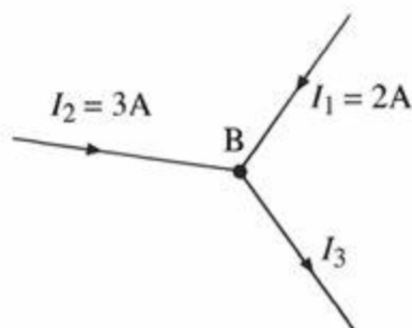
סכום הזרמים, הנכנסים לצומת, שווה לסכום הזרמים היוצאים מהצומת.

זהו **חוק הזרמים של קירכהוף** (חוק זה נקרא בשמות נוספים: **חוק הצומת** וכן **החוק הראשון של קירכהוף**).



דוגמה 7-1

שלושה מוליכים מחוברים לצומת B שבאיור 7-7. דרך שניים מהם נכנסים לצומת הזרמים I_1 ו-I_2, ודרך המוליך השלישי יוצא מהצומת הזרם I_3. חשב את I_3.



איור 7-7 שני זרמים נכנסים לצומת B, וזרם אחד יוצא מהצומת

פתרון

לפי חוק הזרמים של קירכהוף, סכום הזרמים, הנכנסים לצומת, שווה לסכום הזרמים היוצאים מהצומת. סכום הזרמים, הנכנסים לצומת, הוא

$$I_1 + I_2 = 2\text{ A} + 3\text{ A} = 5\text{ A}$$

סכום הזרמים, היוצאים מהצומת, שווה אף הוא ל-5 A. באיור 7-7 יש רק זרם אחד (I_3) היוצא מהצומת, כלומר: $I_3 = 5\text{ A}$.

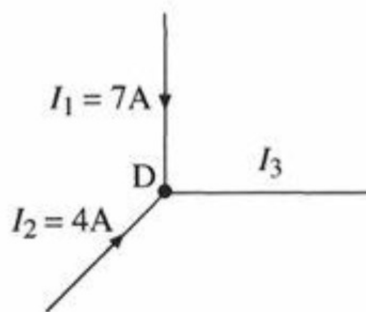




דוגמה 7-2

א. חשב את גודל הזרם I_3 באיור 7-8.

ב. סמן את הכיוון של זרם זה.



איור 7-8

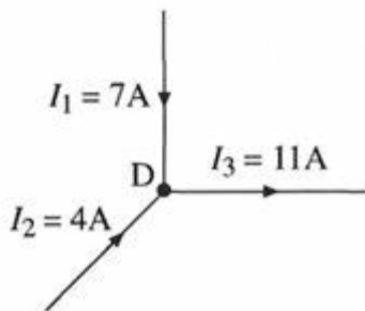
פתרון

א. סכום הזרמים, הנכנסים לצומת D, הוא

$$I_1 + I_2 = 7\ \text{A} + 4\ \text{A} = 11\ \text{A}$$

לכן גם סכום הזרמים היוצאים מצומת זה הוא 11 A. מכאן נסיק כי הזרם I_3 יוצא מהצומת, וגודל הזרם הוא $I_3 = 11\ \text{A}$.

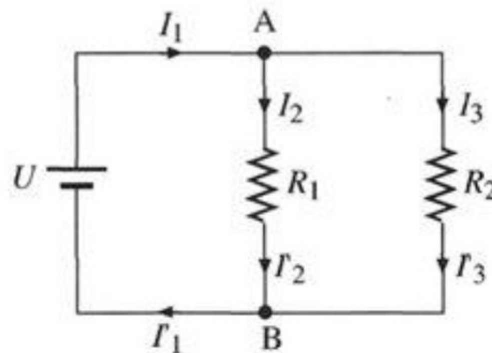
ב. קיבלנו שהזרם I_3 יוצא מהצומת D, ולכן הכיוון של זרם זה הוא מהצומת – ימינה. כיוון הזרם מסומן באיור 7-9.



איור 7-9



נחזור ונתבונן במעגל, כדוגמת המעגל שבאיור 7-4, שבו הזרם מתפצל בין שני נגדים. מעגל כזה מופיע שוב באיור 7-10, ומסומנים בו הזרמים בחלקי המעגל השונים.



איור 7-10 סימוני זרמים במעגל

נשתמש בחוק הזרמים של קירכהוף, כדי למצוא קשרים בין הזרמים השונים. לשם כך נרשום את חוק הזרמים של קירכהוף לצמתים B ו-A.

הזרמים הנכנסים לצומת B: I'_2, I'_3.

הזרמים היוצאים מהצומת B : I_1' .

לכן, לפי חוק הזרמים של קירכהוף, מקבלים :

$$I_1' = I_2^1 + I_3'$$

ובצומת A נקבל :

$$I_1 = I_2 + I_3$$

בפרק הבא נדון בקשרים שבין הזרמים הבאים : I_2 ו- I_2' ; I_3 ו- I_3' ; I_1 ו- I_1' .



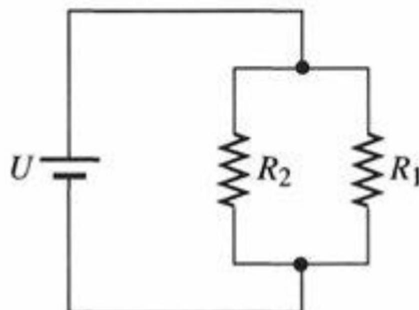
שאלות חזרה



שאלה 7-1

א. כמה צמתים יש במעגל שבאיור 7-1?

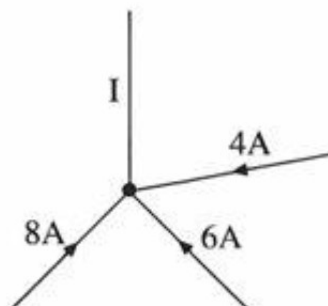
ב. כמה צמתים יש במעגל שבאיור 7-11?



איור 7-11

שאלה 7-2

חשב את הזרם I שבאיור 7-12, וקבע אם הוא נכנס לצומת, או יוצא מהצומת.



איור 7-12

שאלה 7-3

סרטט מעגל חשמלי, שאין בו צמתים. במעגל צריכים להיות שלושה נגדים לפחות.

שאלה 7-4

שני זרמים נכנסים לצומת מסוים: $I_1 = 9\text{ A}$, $I_2 = 3\text{ A}$. שני זרמים אחרים יוצאים מהצומת: $I_3 = 7\text{ A}$, $I_4 = 14\text{ A}$.

א. הוכח כי יש לפחות עוד זרם אחד, הנכנס לצומת או היוצא מהצומת.

ב. בהנחה כי יש רק זרם נוסף אחד, חשב אותו, וקבע אם הוא נכנס לצומת או יוצא מהצומת.

שאלה 7-5

סמן את כל הטענות, הנובעות מחוק הזרמים של קירכהוף.

א. במעגל חשמלי לא ייתכן יותר מצומת אחד.

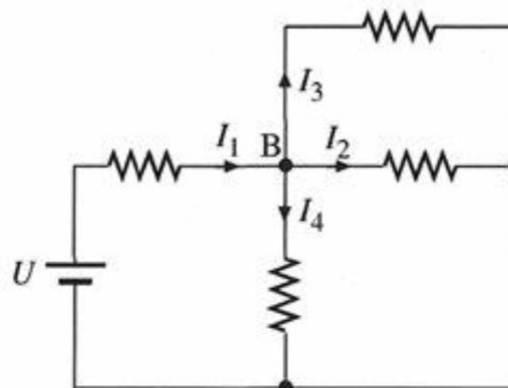
ב. אם שום זרם לא נכנס לצומת, שום זרם גם לא יוצא מהצומת.

ג. אם $I_{\text{נכנס}}$ הוא סכום הזרמים הנכנסים לצומת ו-$I_{\text{יוצא}}$ הוא סכום הזרמים היוצאים מאותו צומת, אז $I_{\text{נכנס}} - I_{\text{יוצא}} = 0$.

ד. אם יש זרם הנכנס לצומת, חייב להיות גם זרם היוצא מהצומת.

שאלה 7-6

רשום את חוק הזרמים של קירכהוף לגבי הצומת B שבאיור 7-13.

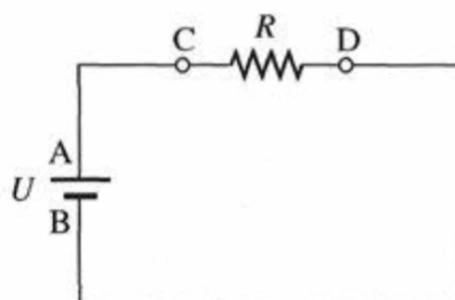


איור 7-13

7.2 חוק המתחים של קירכהוף

מפל מתח

באיור 7-14 חזרנו וסרטטנו מעגל חשמלי פשוט, המכיל מקור מתח* ונגד. למדנו כי כיוון הזרם המוסכם במעגל הוא מההדק החיובי A של המקור, דרך הנגד R, אל ההדק השלילי B של המקור. לצורך ההסבר נניח אפוא שהמטענים במעגל יוצאים מההדק החיובי A של המקור, מגיעים להדק C של הנגד, ומשם ממשיכים עד ההדק B של המקור.



איור 7-14 מעגל חשמלי פשוט

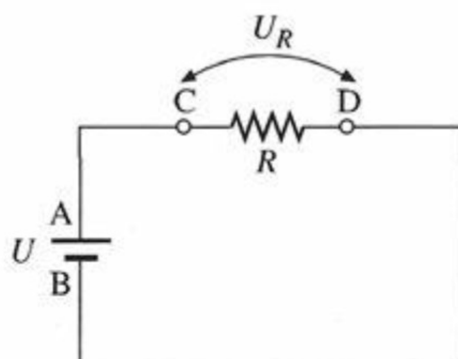
כאשר עובר זרם בנגד, יש התנגשויות בין המטענים הנעים לבין היונים של החומר, שממנו עשוי הנגד. כתוצאה מכך, הנגד מתחמם. אם-כן, לנגד נוספת אנרגיה. אבל אנו יודעים שאנרגיה אינה נוצרת מאליה, אלא רק הופכת צורה.

כפי שהסברנו בפרק הקודם, האנרגיה שהפכה לחום בנגד, היא חלק מהאנרגיה הפוטנציאלית החשמלית, שהייתה למטענים בהדק השמאלי C של הנגד. לכן האנרגיה הפוטנציאלית בהדק הימני D של הנגד, קטנה מהאנרגיה הפוטנציאלית בהדק השמאלי C של הנגד. וכך הדבר גם לגבי הפוטנציאלים בהדקי הנגד.

אנו רואים אפוא שקיים **הפרש פוטנציאלים** בין קצות הנגד. אומרים כי יש **ירידת פוטנציאל**, או **נפילת פוטנציאל**, בין הנקודה C לבין הנקודה D. מאחר שמתח הוא הפרש פוטנציאלים, נקבל כי קיים מתח בין שתי נקודות אלה. אנו אומרים כי על הנגד יש מפל מתח. במעגל שבאיור 7-15, מפל המתח על הנגד R מסומן על-ידי U_R.

---

* בפרק זה נניח כי כל מקורות המתח אינם מגלים התנגדות למעבר המטענים דרכם. מקורות כאלה נקראים **מקורות אידיאליים**. על מקורות לא-אידיאליים, נלמד בהמשך.



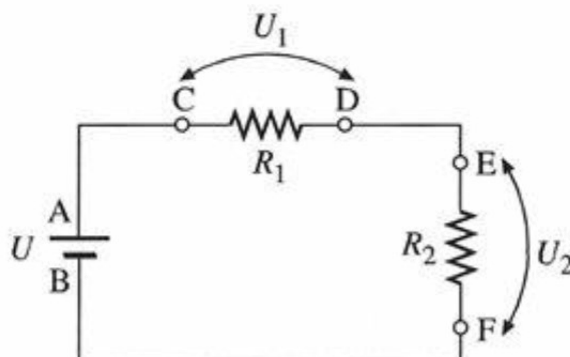
איור 7-15 סימון מפל מתח על נגד

מה גודלו של מפל המתח על הנגד שבאיור 7-15? אם ידוע לנו כי דרך הנגד, שהתנגדותו R, עבר זרם I, הרי שבין קצות הנגד יש מתח U, הנתון, לפי חוק אום, על-ידי $U_R = RI$. מכך אנו למדים, שגודל מפל המתח על הנגד R – הוא $U_R = RI$.

נציין כי אנו מניחים, שלמוליכים במעגל אין התנגדות; לכן לפי חוק אום נקבל, שמפל המתח על כל מוליך – הוא אפס. מכאן שמפל המתח בין הנקודות A ו-C – הוא אפס. לכן מבחינה חשמלית, שתי הנקודות האלה נחשבות לאותה נקודה. וכך גם לגבי הנקודות B ו-D. ובכן, המתח U_R על הנגד – שווה אפוא למתח U של המקור.

מפלי מתח במעגל הכולל נגדים אחדים

עכשיו נתבונן במעגל, שֶׁיֵּש בו שני נגדים, המחוברים בזה אחר זה, כמתואר באיור 7-16. גם לגבי מעגל זה אנו מניחים, שלמוליכים אין התנגדות; ולכן גם במעגל זה, הנקודות A ו-C הן אותה נקודה מבחינה חשמלית, וכך גם הנקודות F ו-B נחשבות לאותה נקודה מבחינה חשמלית.



איור 7-16 מעגל הכולל מקור אחד ושני נגדים, המחוברים בזה אחר זה

נתבונן במעגל שבאיור 7-16. U_1 הוא מפל המתח על הנגד R_1, ו-U_2 הוא מפל המתח על הנגד R_2. אלה כל מפלי המתח בין ההדק החיובי (הנקודה A) של מקור המתח – לבין ההדק השלילי (הנקודה B) של המקור. במעגל זה יש, לכאורה, שני שלבים, שבהם אנרגיה חשמלית הופכת לחום בנגדים, אם כי שני השלבים מתרחשים – למעשה – ביחד.

חוק המתחים כביטוי לשימור האנרגיה במעגל

נבדוק את שינויי האנרגיה החשמלית במעגל. לשם כך נעקוב אחר התנועה של יחידת מטען חיובית אחת במעגל שבאיור 7-16.

לפי הגדרת המתח והדיון בסעיף 6.1, האנרגיה החשמלית של יחידת המטען החיובית בנקודה A (ההדק החיובי של מקור המתח) גדולה בשיעור U מהאנרגיה החשמלית שלה בנקודה B (ההדק השלילי של מקור המתח). האנרגיה נתונה על-ידי $U \times 1 = U$ (יחידת המטען היא קולון אחד).

יחידת המטען נעה במעגל, ומתנגשת ביונים של הנגד R_1. כתוצאה מכך, יחידת המטען מאבדת אנרגיה חשמלית בשיעור U_1 (כלומר: $U_1 \times 1$); בהמשך התנועה – יחידת המטען מתנגשת ביונים של הנגד R_2, ומאבדת אנרגיה חשמלית בשיעור U_2 (כלומר: $U_2 \times 1$); ואז יחידת המטען מגיעה להדק השלילי של מקור המתח.

בשני השלבים שתיארנו, איבדה יחידת המטען את האנרגיה החשמלית שהייתה לה, כלומר, היא איבדה אנרגיה חשמלית ששיעורה U (כלומר: $U \times 1$). לפי חוק שימור האנרגיה, נקבל כי

$$U = U_1 + U_2$$

ממשוואה זו נסיק לגבי המעגל שבאיור 7-16 כי

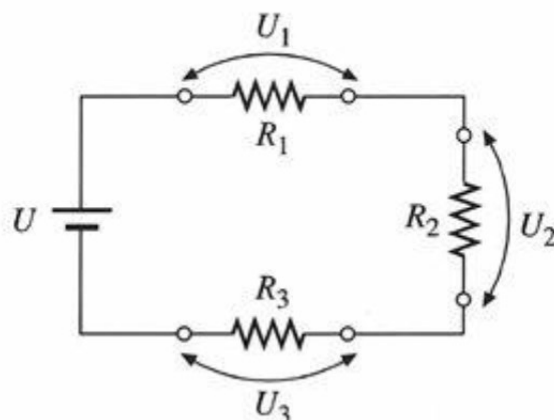
מתח המקור U שווה לסכום מפלי המתח על הנגדים:

$$U = U_1 + U_2$$

התוצאה שקיבלנו חלה על כל מעגל, שבו הנגדים מחוברים בזה אחר זה. באיור 7-17 מתואר מעגל, הכולל שלושה נגדים, המחוברים בזה אחר זה. גם במעגל זה נקבל כי

מתח המקור U שווה לסכום מפלי המתח על הנגדים:

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$



איור 7-17 מעגל הכולל מקור אחד ושלושה נגדים, המחוברים בזה אחר זה

שתי המשוואות האחרונות מבטאות את הכלל הבא:

במעגל שבו כל הנגדים מחוברים בזה אחר זה, סכום מפלי המתח על כל הנגדים – שווה למתח המקור.

כלל זה נקרא **חוק המתחים של קירכהוף**, או **החוק השני של קירכהוף**. בהמשך נלמד כיצד להשתמש בשני חוקי קירכהוף - חוק הזרמים וחוק המתחים - כדי לנתח מעגלים חשמליים. אך לפני כן נגדיר מושגים וסימנים, שיעזרו לנו לנתח מעגלים בצורה שיטתית ויעילה. התועלת שבמושגים ובסימונים אלה – תתברר לנו, כשנדון במעגלים מורכבים.



שאלות חזרה



שאלה 7-7

נסח את חוק המתחים של קירכהוף לגבי המעגל שבאיור 7-14.

שאלה 7-8

הנה נתוני המעגל שבאיור 7-16:

$U_1 = 6\text{ V}$

$U_2 = 9\text{ V}$

חשב את מתח המקור.

שאלה 7-9

מתח המקור במעגל שבאיור 7-17 – הוא 12 V. המתח על הנגד R_1 הוא 4 V; והמתח על הנגד R_2 הוא 6 V. מהו המתח על הנגד R_3?

שאלה 7-10

סמן את הטענות הנכונות.

א. סכום המתחים, הנכנסים לצומת, שווה לסכום המתחים, היוצאים מהצומת.

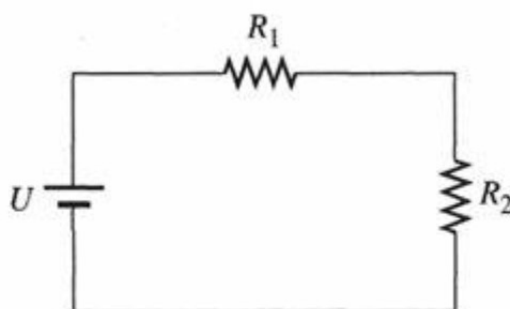
ב. סכום הזרמים במעגל, שבו לכל הנגדים התנגדות קבועה, שווה למתח המקור.

ג. סכום הזרמים, הנכנסים לצומת, שווה לסכום הזרמים, היוצאים מהצומת.

ד. סכום מפלי המתחים על כל הנגדים במעגל, שבו הנגדים מחוברים בזה אחר זה, שווה למתח המקור.

7.3 סימון מתחים במעגלים חשמליים

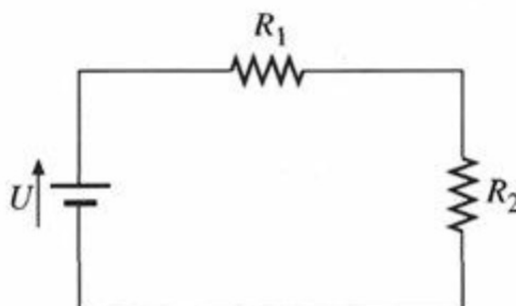
באיור 7-18 מתואר מעגל, המכיל מקור מתח ושני נגדים. במעגל כזה יש מתחים שונים: המתח על המקור, המתח על הנגד R_1 והמתח על הנגד R_2. כדי למצוא את משוואת המתחים במעגל, בהתאם לחוק השני של קירכהוף, נוח להשתמש בסימוני עזר של המתחים, שנסביר בסעיף זה.



איור 7-18 מעגל המכיל מקור מתח ושני נגדים

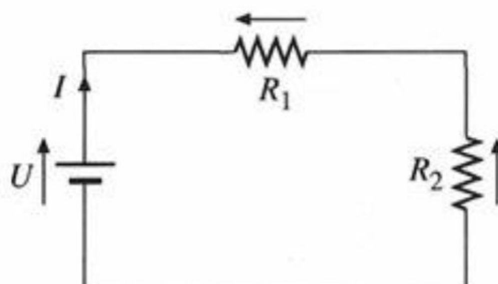
נשתמש בחץ, כדי לסמן מתח על רכיב במעגל. החץ צריך להיות מסורטט כך, שראש החץ פונה אל הדק הרכיב, שבו הפוטנציאל גבוה יותר מאשר בהדק האחר, וזנב החץ נמצא קרוב

להדק הרכיב, שבו הפוטנציאל נמוך יותר.* דוגמה לכך מתוארת באיור 7-19. כיוון החץ בציור זה, הוא מההדק השלילי של מקור המתח – אל ההדק החיובי של המקור. וכזכור, פוטנציאל ההדק החיובי גבוה יותר מפוטנציאל ההדק השלילי.



איור 7-19 סימון מתח על מקור המתח במעגל

בהתאם להסברנו, סומנו חִצִים ליד הנגדים במעגל שבאיור 7-20. הכיוון של כל חץ כזה – הפוך לכיוון זרם בכל נגד, כי כיוון הזרם בנגד הוא מפוטנציאל גבוה לנמוך.



איור 7-20 כיוון הזרם וסימוני מתחים במעגל חשמלי

נציין כי בניגוד לכיוון הזרם בנגד, כיוון הזרם במקור מתח, הוא מפוטנציאל נמוך לפוטנציאל גבוה. מכאן נוכל להסיק כי הנגדים במעגל מתנהגים באופן "הפוך" ממקורות המתח: מקור המתח מספק אנרגיה למעגל, ואילו הנגדים צורכים אותה. נזכיר כאן שֶׁיֵּש רכיבים, היכולים לשמש בתנאים מסוימים כצרכנים (כלומר, צורכי אנרגיה), ואילו בתנאים אחרים הם משמשים כמקורות (כלומר, מספקים אנרגיה למעגל).

* יש המסמנים פוטנציאל גבוה על-ידי הסימן "+"; ופוטנציאל נמוך יותר, על-ידי "–".

מצבר המכונית – צרכן או מקור מתח?

המצבר במכונית הוא דוגמה לרכיב, שבתנאים מסוימים הוא צרכן, ובתנאים אחרים הוא מקור מתח. המצבר נטען (כלומר, מקבל אנרגיה) כשהמנוע פועל, ואחר-כך מספק זרם (כלומר, מחזיר את האנרגיה שקיבל) להפעלת המערכות השונות במכונית, כגון פנסים, מערכת ההצתה במנוע בנזין ועוד.

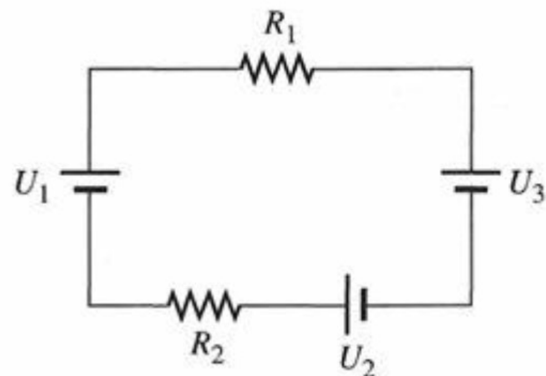
אם-כן, כשהמצבר נטען, הוא משמש כצרכן ; וכשהמצבר מספק זרם, הוא משמש כמקור מתח.

כאשר רכיב, כדוגמת המצבר הנטען במכונית, משמש כצרכן, כיוון חץ הזרם הפוך לכיוון החץ, המסמן את המתח של הרכיב; וכאשר רכיב כזה משמש כמקור, המספק אנרגיה חשמלית, כיוון חץ הזרם הוא ככיוון החץ, המסמן את המתח של הרכיב.

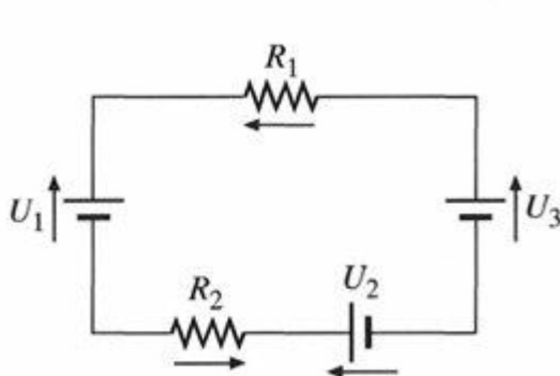
רישום משוואת המתחים במעגל

עד עכשיו עסקנו במעגלים פשוטים למדי. כאשר נעסוק במעגלים מורכבים יותר, נשתמש בשיטת סימון, שבעזרתה נוכל לרשום בצורה נוחה את משוואת המתחים של קירכהוף.

נסביר שיטת סימון זו, בעזרת המעגל שבאיור 7-21. מעגל זה מכיל שלושה מקורות מתח ושני נגדים. באיור 7-22 מסומנים החִצים ליד רכיבי המעגל. בהמשך נלמד לקבוע את כיוון הזרם במעגל כזה, כך שניתן יהיה לדעת אך כיווני החִצים שליד הנגדים.

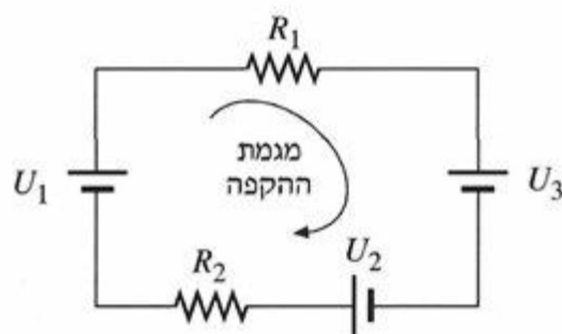


איור 7-21
מעגל המכיל מקורות ונגדים

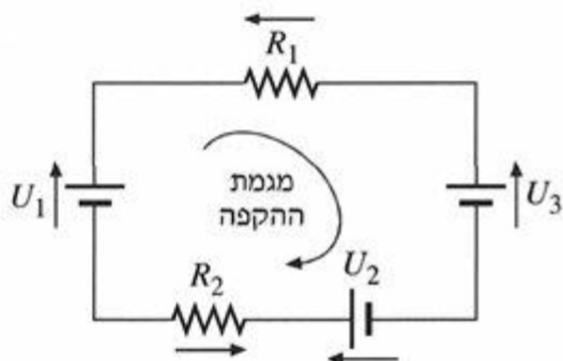


איור 7-22
חִצים ליד רכיבי המעגל

נקיף עכשיו את המעגל במגמה מסוימת. אנו יכולים לבחור, אם להקיף את המעגל במגמת התנועה של מחוגי השעון – או במגמה הפוכה. המגמה שתיבחר תיקרא **מגמת ההקפה**. באיור 7-23 בחרנו במגמת התנועה של מחוגי השעון, כמגמת ההקפה, ובאיור 7-24 הוספנו את החִצִים ליד רכיבי המעגל. אין קשר בין מגמת ההקפה, שאנו בוחרים, לבין כיווני חִצֵי המתח.



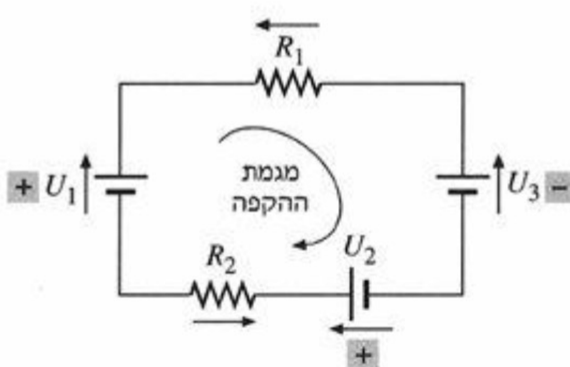
איור 7-23
מגמת ההקפה של המעגל



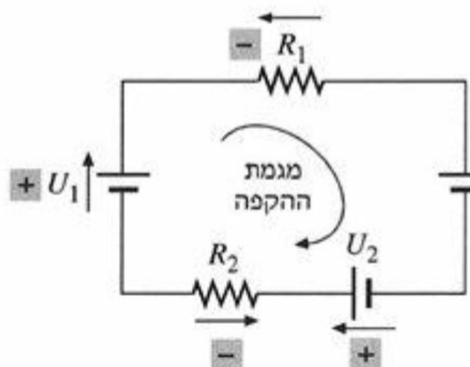
איור 7-24
מגמת ההקפה והחִצִים ליד רכיבי המעגל

נסמן עכשיו באופן הבא כל מקור מתח, שנפגוש בעת ההקפה:

אם כיוון החץ ליד מקור מתח, הוא כמגמת ההקפה, נרשום את הסימן "+" ליד מקור זה, כפי שמתואר באיור 7-25; ואם כיוון החץ ליד מקור מתח, הפוך למגמת ההקפה, נרשום את הסימן "–" ליד מקור זה.



איור 7-25
סימוני "+" או "–" ליד כל מקור מתח במעגל



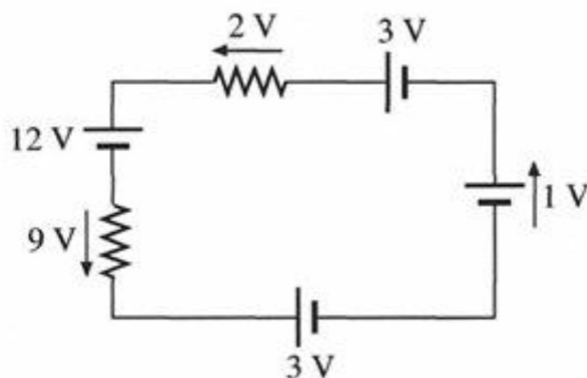
איור 7-26
סימוני "+" או "–" ליד כל נגד במעגל

באופן דומה נסמן "+" או "–" ליד כל נגד במעגל, וזאת בהתאם למגמת ההקפה ולכיוון החץ שליד הנגד המתאים. דוגמה לסימון זה – מתוארת באיור 7-26.



דוגמה 7-3

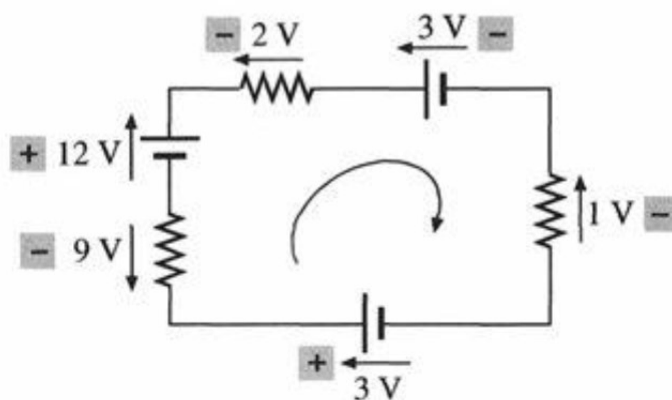
חשב את הסכום הכולל של המתחים במעגל שבאיור 7-27.



איור 7-27

פתרון

באיור 7-28 בחרנו את מגמת ההקפה כמגמת התנועה של מחוגי השעון. כן הוספנו את החִצִים ליד מתחי המקורות. בהתאם לכלל שקבענו, סומנו "+" או "-" ליד כל אחד ממתחים אלה.



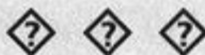
איור 7-28

סכום המתחים הוא

$$(+12)+(-2)+(-3)+(-1)+(+3)+(-9)=12-2-3-1+3-9=0$$

התוצאה שקיבלנו, כלומר, שסכום המתחים שווה לאפס, אינה מקרית. היא מתאימה לחוק המתחים של קירכהוף. נראה זאת בסעיף הבא.

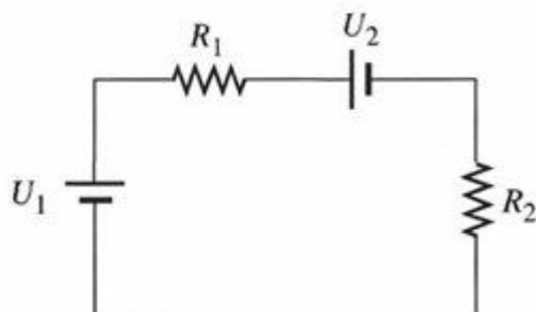





שאלות חזרה

שאלה 7-11

סמן באמצעות חץ את המתח ליד כל אחד מהמקורות שבאיור 7-29.



איור 7-29

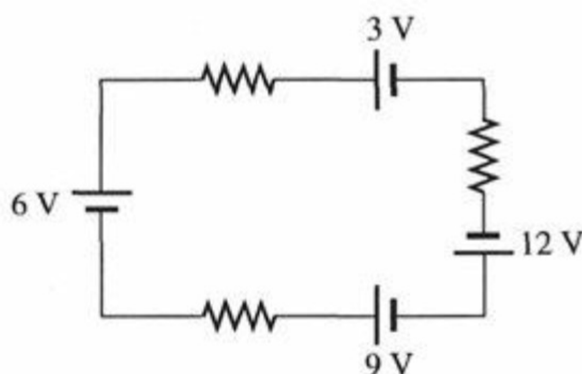
שאלה 7-12

א. בחר וסמן את מגמת ההקפה של המעגל המתואר באיור 7-30.

ב. סמן חץ ליד כל מקור מתח באיור 7-30, כך שכל חץ יצביע על הדק המקור, שהפוטנציאל שלו גבוה יותר מזה של ההדק השני.

ג. סמן "+" או "–" ליד כל אחד ממקורות המתח במעגל.

ד. חשב את סכום מתחי המקורות במעגל, תוך התחשבות בסימן שליד כל מקור.



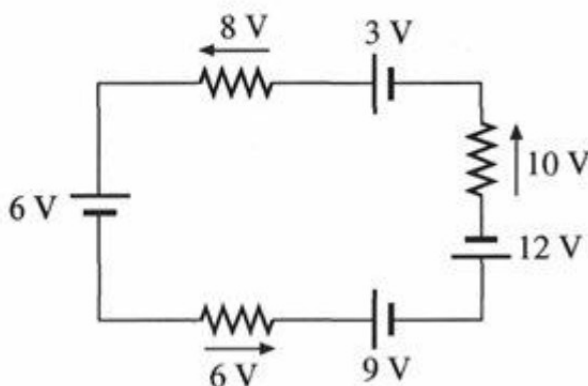
איור 7-30

שאלה 7-13

א. בחר וסמן את מגמת ההקפה של המעגל המתואר באיור 7-31.

ב. סמן "+" או "–" ליד כל אחד מהנגדים במעגל.

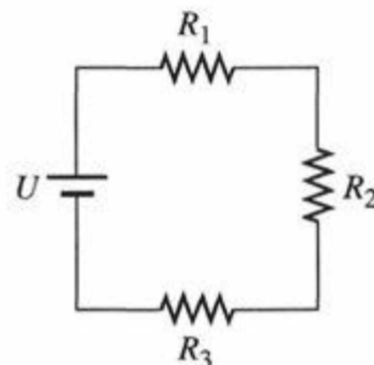
ג. חשב את סכום מתחי הנגדים במעגל, תוך התחשבות בסימן שליד כל נגד.



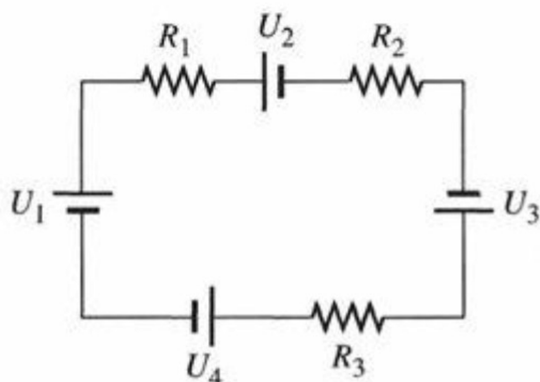
איור 7-31

7.4 הצורה הכללית של חוק המתחים של קירכהוף

בסעיף 7.2 כבר ניסחנו את חוק המתחים של קירכהוף, האומר: במעגל שבו כל הנגדים מחוברים בזה אחר זה, סכום מפלי המתח על כל הנגדים – שווה למתח המקור. האם חוק המתחים של קירכהוף נכון רק לגבי מעגלים, שבהם כל הנגדים מחוברים בזה אחר זה, כמו במעגל שבאיור 7-32?



איור 7-32
מעגל שבו כל הנגדים מחוברים בזה אחר זה



איור 7-33
מעגל המכיל כמה מקורות מתח וכמה נגדים

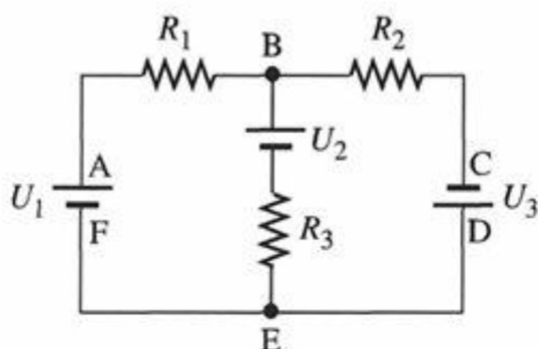
באיור 7-33 נתון מעגל המכיל כמה מקורות מתח וכמה נגדים. נבדוק את חוק המתחים של קירכהוף – גם לגבי מעגל כזה, שבו הנגדים לא מחוברים בזה אחר זה.

החוג במעגל חשמלי

ניתן להשתמש בחוק המתחים של קירכהוף לגבי כל מעגל. אם נתון מעגל מורכב, ניתן לחלק אותו לחלקים שונים, ולהשתמש בחוק המתחים לגבי כל חלק בנפרד. כדי שנוכל לזהות חלקים אלה, נסביר מושג חדש: **חוג**.

לצורך הסברנו, נבחר נקודה כלשהי במעגל שבאיור 7-34. הנקודה שבחרנו היא A. עכשיו ננוע לאורך המעגל החשמלי, עד שנחזור להתחלה, כך שנעבור רק פעם אחת דרך כל נקודה. המסלול הסגור שבחרנו הוא

$$A \rightarrow F \rightarrow E \rightarrow B \rightarrow A$$



איור 7-34

מסלול סגור זה במעגל הוא דוגמה לחוג. עכשיו אנו יכולים להגדיר חוג.

חוג הוא מסלול סגור כלשהו לאורך מעגל חשמלי, כך שלגבי המסלול מתקיימים התנאים הבאים:

- *המסלול מתחיל בנקודה מסוימת במעגל, ומסתיים באותה נקודה עצמה.*
- *לאורך המסלול אנו עוברים רק פעם אחת דרך כל נקודה (פרט לנקודת ההתחלה, כמובן).*

הנה דוגמה נוספת לחוג במעגל שבאיור 7-34.

$$A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow A$$

במעגל זה יש חוג נוסף:

$$B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow B$$

עכשיו נוכל לנסח את חוק המתחים של קירכהוף בצורתו הכללית:

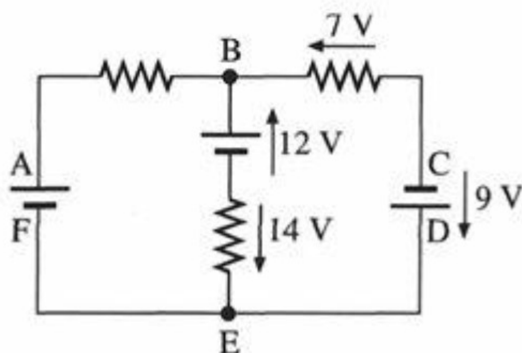
חוק המתחים של קירכהוף

סכום המתחים (כולל הסימנים המתאימים שלהם) בכל אחד מהחוגים של מעגל חשמלי הוא אפס.



דוגמה 7-4

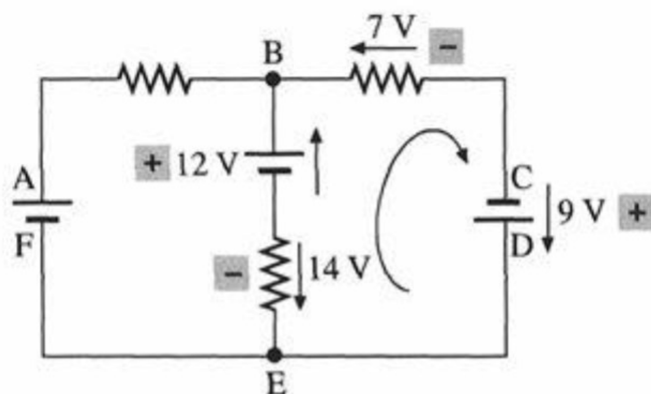
הראה כי סכום המתחים (כולל הסימנים המתאימים) הוא אפס בחוג BEDCB שבאיור 7.37.



איור 7-35

פתרון

באיור 7-36 מסומנת מגמת ההקפה בחוג BEDCB על-ידי חץ. כן סומנו חִצים ליד מקורות המתח והנגדים, ובהתאם לכך סומן "+" או "–" ליד כל מקור מתח וליד כל נגד בחוג זה.



איור 7-36

סכום המתחים בחוג BEDCB הוא

$$(+12) + (-7) + (+9) + (-14) = 12 - 7 + 9 - 14 = 0$$

התוצאה שקיבלנו מתאימה לחוק המתחים של קירכהוף.



מחוק המתחים של קירכהוף ניתן להסיק, כי **סכום מתחי המקורות (תוך הקפדה על כיווני החִצים) בחוג – שווה בגודלו לסכום מפלי המתח החוג זה**. נדגים זאת לגבי החוג BEDCB במעגל שבאיור 7-36.

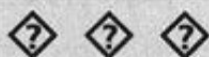
סכום מתחי המקורות בחוק:

$$12 + 9 = 21\ V$$

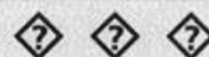
סכום מפלי המתח בחוג:

$$-7 + (-14) = -7 - 14 = -21\ V$$

אנו רואים כי סכום מתחי המקורות בחוג זה שווה בגודלו – והפוך בסימנו – לסכום מפלי המתח בחוג. תוצאה כזאת תתקבל לגבי כל חוק וחוג בכל מעגל חשמלי.



שאלות חזרה



שאלה 7-14

סמן את כל החוגים במעגל שבאיור 7-37:

א. ABEFA

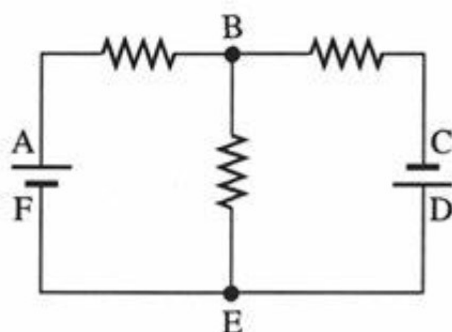
ב. FEBCD

ג. ABCDEFA

ד. BCDEB

ה. ABECD

ו. DEFAB



איור 7-37

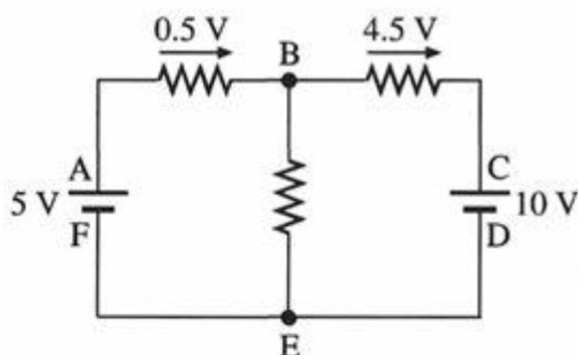
שאלה 7-15

מהו סכום המתחים בחוג ABEFA שבאיור 7-36? נמק.

שאלה 7-16

א. חשב את סכום מתחי המקורות בחוג ABCDEFA שבאיור 7-38.

ב. חשב את סכום מפלי המתח בחוג זה.



איור 7-38

שאלה 7-17

א. כמה חוגים יש במעגל שבאיור 7-32?

ב. כמה חוגים יש במעגל שבאיור 7-33?

שאלה 7-18

סמן את כל הטענות הנכונות:

א. חוק הזרמים של קירכהוף קובע כי סכום הזרמים בכל חוג של מעגל חשמלי שווה לאפס.

ב. חוג הוא מעגל חשמלי, הכולל לפחות שני מקורות מתח.

ג. לפי חוק המתחים של קירכהוף, סכום מתחי מקורות המתח בחוג – שווה בגודלו לסכום המתחים על הנגדים באותו חוג.

ד. כל מעגל חשמלי מכיל לפחות שני חוגים.

ה. לפי חוק המתחים של קירכהוף, סכום המתחים בכל חוג שווה לאפס.

סיכום פרק 7

- צומת הוא נקודה במעגל, שבו נפגשים לפחות שלושה מהרכיבים במעגל (הדק אחד של כל רכיב).
- חוק הזרמים של קירכהוף: סכום הזרמים, הנכנסים לצומת, שווה לסכום הזרמים, היוצאים מהצומת.
- חוק המתחים של קירכהוף: במעגל, שבו כל הנגדים מחוברים בזה אחר זה, סכום מפלי המתח על כל הנגדים – שווה למתח המקור.
- כיוון חץ המתח בנגד – הפוך לכיוון חץ הזרם. אבל במקור מתח (במעגל, שבו כל הנגדים מחוברים בזה אחר זה) – כיוון חץ המתח זהה לכיוון חץ הזרם. מוסיפים חץ ייחוס למעגל, וכיוון חץ זה הוא שרירותי. בהתאם לכיוון חץ הייחוס וחץ מתח, מוסיפים סימן מתאים ("+" או "–") לכל חץ מתח.
- חוג סגור (ובקיצור: חוג) הוא מסלול כלשהו לאורך מעגל חשמלי; החוג הסגור מתחיל בנקודה מסוימת במעגל, ומסתיים באותה נקודה עצמה, כשלאורך המסלול עוברים פעם אחת דרך כל נקודה (פרט לנקודת ההתחלה, כמובן).
- הצורה הכללית של חוק המתחים של קירכהוף: הסכום האלגברי של כל המתחים, בחוג סגור כלשהו במעגל חשמלי, הוא אפס.

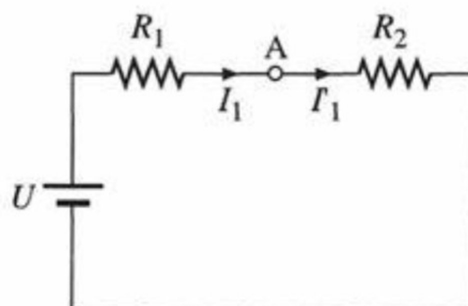
8

מעגלים טוריים, מקביליים ומעורבים

בפרק הקודם למדנו את שני חוקי קירכהוף. בפרק זה ניעזר בחוקי קירכהוף, כדי לפתור מעגלים, המכילים מקור מתח אחד וכמה נגדים. בפרק הבא ניעזר בחוקים אלה, כדי לפתור מעגלים מורכבים, המכילים כמה חוגים.

8.1 מעגל טורי

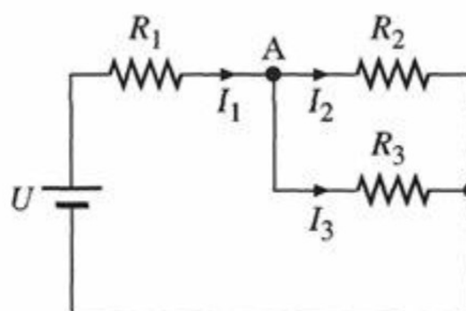
נתבונן במעגל שבאיור 8-1, שבו שני הנגדים R_1 ו-R_2 מחוברים בזה אחר זה. ניווכח מיד כי במעגל כזה, הזרם הנכנס לנקודה כלשהי, שווה לזרם היוצא מאותה נקודה. מכאן נסיק, שאותו זרם זורם לאורך המעגל כולו.



איור 8-1 מעגל שבו שני נגדים מחוברים בזה אחר זה

כדי להיווכח בכך, נשתמש בחוק הזרמים של קירכהוף. נתבונן בנקודה A* כלשהי במעגל, ונרצה לבדוק אם הזרם I_1, הנכנס לנקודה זו, שווה לזרם I'_1 היוצא ממנה. לשם כך נתבונן תחילה במעגל שבאיור 8-2.

* הנקודה A במעגל מייצגת חתך של התיל המוליך, וקו במעגל מייצג תיל מוליך.



איור 8-2

במעגל הזה הוספנו את הנגד R_3, שבו זורם הזרם I_3. עכשיו הנקודה A היא נקודת צומת. לפי חוק הזרמים של קירכהוף, סכום הזרמים הנכנסים לצומת, שווה לסכום הזרמים היוצאים מהצומת. נשתמש בחוק הזרמים לגבי הצומת A, ונקבל:

$$I_1 = I_2 + I_3$$

ברור כי קשר זה יתקיים, גם אם נגדיל את ההתנגדות R_3 יותר ויותר. עתה נניח שאנו מנתקים את הנגד R_3 מהמעגל שבאיור 8-2. ניתוק R_3 מהמעגל, הרי זה כאילו שמים במקומו נגד בעל התנגדות גדולה עד מאוד (אינסופית), כך שזרם אינו יכול לעבור דרכו. כלומר, מקבלים כי

$$I_3 = 0$$

גם במקרה זה, חוק הזרמים לגבי הנקודה A עדיין מתקיים, ולכן נקבל:

$$I_1 = I_2$$

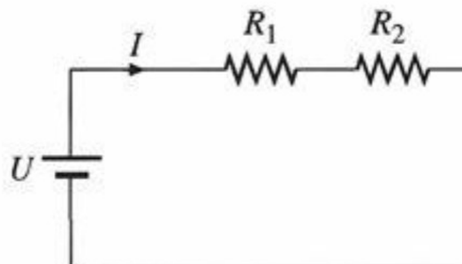
אבל כאשר מנתקים את הנגד R_3 מהמעגל שבאיור 8-2, מקבלים את המעגל שבאיור 8-1. נסיק מכך כי הזרם I_1, הנכנס לנקודה A במעגל שבאיור 8-1, שווה לזרם $I_1^{'}$ היוצא מנקודה זו. (נזכיר כי אנו מתכוונים לזרם הנכנס לחתך מסוים של המוליך – חתך המיוצג על-ידי הנקודה A – ולזרם היוצא מחתך זה).

מסקנה זו נכונה לא רק לנקודה אחת במעגל חשמלי, אלא לכל נקודה, שאינה נקודת צומת במעגל: הזרם הנכנס לנקודה במעגל חשמלי, שאינה נקודת צומת, שווה לזרם היוצא מנקודה זו.

במעגל שבאיור 8-1 אין כלל נקודות צומת, ולכן אותו זרם זורם לאורך כל המעגל הזה. מכאן שהזרם הנכנס לנגד R_1 במעגל זה, שווה לזרם היוצא מהנגד. וכך הדבר גם לגבי הנגד R_2. אם-כן, המסקנה שהסקנו לגבי זרם, הנכנס לנקודה ויוצא ממנה, נכונה גם לכל נגד:

הזרם, הנכנס לנגד במעגל חשמלי, שווה לזרם היוצא ממנו.

נחזור ונסרטט מעגל, שיש בו מקור מתח ושני נגדים, המחוברים בזה אחר זה (איור 8-3).



איור 8-3

במעגל זה יש חוג אחד בלבד; שני הנגדים מחוברים בזה אחר זה, ואין ביניהם צמתים. במקרה כזה אומרים כי **הנגדים מחוברים בחיבור טורי**, ובקיצור: **הנגדים מחוברים בטור**, או: **הנגדים בטור**. מעגל, שבו כל הנגדים מחוברים בטור, נקרא **מעגל טורי**.

אם-כן, המעגל שבאיור 8-3 הוא מעגל טורי. ראינו כי הזרם שווה לאורך כל המעגל הזה. מסקנה זו נכונה לכל מעגל טורי:

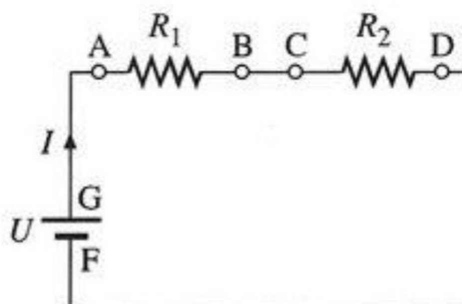
במעגל טורי – אותו זרם זורם לכל אורך המעגל.

נסיק מכאן כי

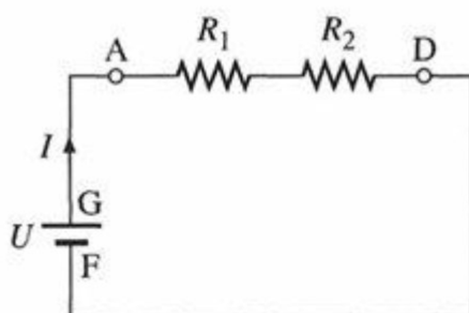
כאשר נגדים מחוברים בטור, זורם בהם אותו זרם.

ההתנגדות השקולה של נגדים בטור

באיור 8-4 מופיע שוב מעגל ובו שני נגדים (R_1 ו-R_2) המחוברים בטור.



איור 8-4



איור 8-5

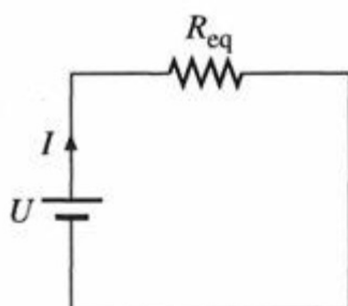
כפי שהסברנו בסעיפים קודמים, הנקודה B והנקודה C באיור 8-4 הן אותה נקודה מבחינה חשמלית. לכן המעגל שבאיור 8-4 והמעגל שבאיור 8-5 זהים מבחינה חשמלית. פירוש הדבר שבשני המעגלים יש אותו זרם I, ואותו מתח קיים בין הנקודות A ו-D בשני המעגלים.

נבדוק עכשיו את ההתנגדות לתנועה, ש"מרגיש" כל מטען, הנע במעגל. ההתנגדות לתנועת מטען בין הנקודות A ו-D, שווה להתנגדות לתנועתו, שמגלה הנגד R_1, ועוד ההתנגדות לתנועתו, שמגלה הנגד R_2. אם-כן, ההתנגדות ש"מרגיש" המטען בין הנקודות A ו-D, שווה לסכום ההתנגדויות של הנגדים R_1 ו-R_2. נסמן על-ידי R_{eq} את ההתנגדות, שכל מטען "מרגיש" בין הנקודות A ו-D, ונקבל כי

$$R_{eq} = R_1 + R_2 \quad (8\text{-}1)$$

eq – קיצור של equivalent (שקול)

אנו אומרים כי הנגד, שהתנגדותו R_{eq}, **שקול** לשני הנגדים R_1 ו-R_2, המחוברים בטור; שכן אם נחליף את שני הנגדים R_1 ו-R_2, המחוברים בטור, בנגד יחיד שהתנגדותו R_{eq}, לא נשנה דבר מבחינת ההתנגדות לתנועת המטענים הנעים במעגל. לא יחול שינוי בזרם I, וגם המתח בין הנקודות F ו-G (שהוא המתח בין הדקי מקור המתח) לא ישתנה כלל.

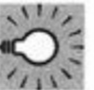


איור 8-6

המעגל, המתקבל על-ידי החלפת שני הנגדים בנגד השקול שלהם, נקרא **מעגל שקול** למעגל המקורי. באיור 8-6 מופיע המעגל השקול למעגל שבאיור 8-4. ההתנגדות R_{eq}, השקולה להתנגדות כל הנגדים במעגל, נקראת **ההתנגדות השקולה של המעגל**, ובקיצור: **התנגדות המעגל**.

אם-כן, נסיק כי

ההתנגדות השקולה של שני נגדים, המחוברים בטור, שווה לסכום ההתנגדויות של שני הנגדים.



דוגמה 8-1

שני נגדים מחוברים בטור. התנגדות אחד הנגדים היא $16\ \Omega$, והתנגדות הנגד השני – $50\ \Omega$. מהי ההתנגדות השקולה של שני הנגדים?

פתרון

ההתנגדות השקולה של שני הנגדים שווה לסכום ההתנגדויות שלהם. נתון כי $R_1 = 16\ \Omega$, $R_2 = 50\ \Omega$, ולפי משוואה (8-1), נקבל:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 = 16 + 50 = 66\ \Omega$$

ההתנגדות השקולה של שני הנגדים היא $66\ \Omega$.



בדרך שבה מצאנו את ההתנגדות השקולה של שני נגדים, המחוברים בטור, נוכל למצוא גם את ההתנגדות השקולה של כל מספר של נגדים, המחוברים בטור. נסיק כי:

ההתנגדות השקולה של מספר כלשהו של נגדים, המחוברים בטור, שווה לסכום ההתנגדויות של הנגדים.

אם ידועים לנו הסכום U של מפלי המתח על הנגדים במעגל טורי, והזרם I במעגל זה, נוכל לדעת את גודל ההתנגדות השקולה של נגדים אלה, על-ידי שימוש בחוק אום. נקבל כי

$$R_{eq} = \frac{U}{I} \qquad (8\text{-}2)$$

הסכום U של מפלי המתח על הנגדים במעגל זה, שווה למתח המקור.



דוגמה 8-2

במעגל טורי יש ארבעה נגדים זהים, המחוברים בטור למקור מתח של $12\ V$. התנגדות כל אחד מהנגדים היא $75\ \Omega$. מהו הזרם במעגל?

פתרון

ההתנגדות השקולה של הנגדים היא

$$R_{eq} = 75 + 75 + 75 + 75 = 75 \times 4 = 300\ \Omega$$

לפי חוק המתחים של קירכהוף, סכום מפלי המתח על הנגדים, שווה למתח המקור: $U = 12\ \text{V}$. מכאן שהזרם במעגל הוא, לפי משוואה (8-2),

$$I = \frac{U}{R_{eq}} = \frac{12}{300} = 0.04\ \text{A}$$



מהדוגמה האחרונה אנו רואים, כי כאשר נתונים ארבעה נגדים זהים המחוברים בטור, כך שהתנגדות כל אחד מהם היא R, כלומר:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$$

ההתנגדות השקולה שלהם נתונה על-ידי

$$R_{eq} = 4R$$

באופן כללי, כאשר נתונים n נגדים זהים, המחוברים בטור, כך שהתנגדות כל אחד מהם היא R, ההתנגדות השקולה שלהם היא

$$R_{eq} = nR \qquad (8\text{-}3)$$

הקשר בין המתחים על נגדים, המחוברים בטור

ראינו כי כאשר נגדים מחוברים בטור, בכולם זורם אותו זרם. עכשיו נרשום את הקשר בין גודל המתחים על הנגדים, המחוברים בטור, לבין התנגדויות הנגדים:

היחס בין המתחים על נגדים, המחוברים בטור, שווה ליחס בין התנגדויות הנגדים.

כדי להיווכח בנכונות הקשר, נסתכל שוב באיור 8-4. לפי חוק אום, המתח U_1 על הנגד R_1 הוא

$$U_1 = IR_1$$

והמתח U_2 על הנגד R_2 הוא

$$U_2 = IR_2$$

מכאן נקבל כי

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{IR_1}{IR_2}$$

ומכאן:

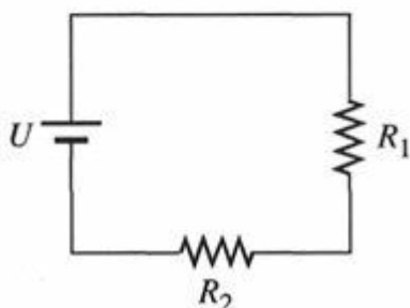
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} \qquad (8\text{-}4)$$

כלומר, יחס המתחים על נגדים, המחוברים בטור, הוא כיחס ההתנגדויות של נגדים אלה.



דוגמה 8-3

נתון המעגל שבאיור 8-7, ובו $R_1 = 8\ \Omega$, $R_2 = 16\ \Omega$. כן נתון שהמתח על הנגד R_1 הוא 12 V. מהו המתח על הנגד R_2?



איור 8-7

פתרון

נשתמש במשוואה (8-4):

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

עמ' 187

נציב את הנתונים, ונקבל כי

$$\frac{12}{U_2} = \frac{8}{16}$$

ומכאן:

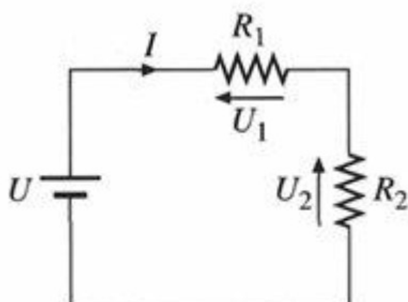
$$U_2 = \frac{12 \times 16}{8} = 24\ \text{V}$$

המתח על הנגד R_2 הוא 24 V.



הקשר בין הספקי צרכנים, המחוברים בטור, לבין הספק המקור

כדי למצוא את הקשר בין הספקי צרכנים המחוברים בטור, לבין הספק המקור, נסתכל במעגל שבאיור 8-8.



איור 8-8 שני צרכנים במעגל טורי

במעגל טורי זה יש שני צרכנים (או נגדים) המחוברים בטור, ולכן זרם המעגל I זורם בכל אחד מהם. ההספק החשמלי נתון על-ידי משוואה (6-3): $P = IU$. מכאן שההספק P_1 של הצרכן R_1 הוא

$$P_1 = IU_1$$

ההספק P_2 של הצרכן R_2 הוא

$$P_2 = IU_2$$

מתח המקור הוא U, והספק המקור P (הנקרא גם הספק המעגל) נתון על-ידי

$$P = IU$$

לפי חוק המתחים של קירכהוף,

$$U = U_1 + U_2$$

ולכן הספק המקור הוא

$$P = IU = I(U_1 + U_2) = IU_1 + IU_2$$

אבל ראינו כי הספק הצרכן R_1 הוא $P_1 = IU_1$, והספק הצרכן R_2 הוא $P_2 = IU_2$. מכאן נקבל כי

$$P = IU = I(U_1 + U_2) = IU_1 + IU_2 \;\; + P_1 + P_2$$

כלומר:

$$P = P_1 + P_2 \qquad (8\text{-}5)$$

מצאנו כי במעגל טורי, המכיל שני צרכנים, הספק המקור שווה לסכום הספקי הצרכנים. באופן כללי מקבלים כי

במעגל טורי – הספק המקור שווה לסכום הספקי הצרכנים.

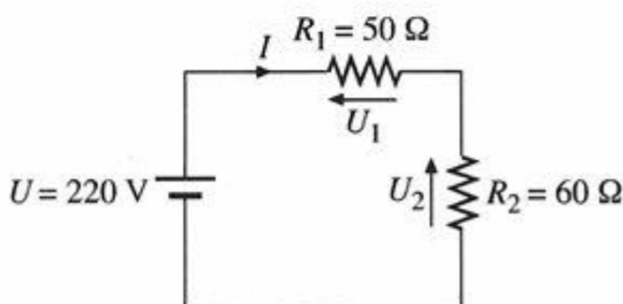
טענה זו נכונה לכל מספר של צרכנים, ולא רק לשני צרכנים.

דוגמה 8-4

א. חשב את ההספק של כל צרכן במעגל שבאיור 8-9.

ב. חשב את סכום ההספקים של הצרכנים במעגל זה.

ג. מהו הספק המקור במעגל זה?



איור 8-9

פתרון

א. שני הצרכנים במעגל מחוברים בטור. ההתנגדות השקולה שלהם R_{eq} היא

$$R_{eq} = R_1 + R_2 = 50 + 60 = 110\ \Omega$$

הזרם I במעגל נתון על-ידי

$$I = \frac{U}{R_{eq}} = \frac{220}{110} = 2\ \text{A}$$

נחשב את הספקי הצרכנים:

הספק של צרכן, שהתנגדותו R, נתון על-ידי משוואה (6-3):

$$P = IU = I^2R$$

כאשר I הוא הזרם בצרכן, ו-U הוא המתח על הצרכן.

מכאן שההספק P_1 של הצרכן R_1 הוא

$$P_1 = I^2R_1 = 2^2 \times 50 = 4 \times 50 = 200\ \text{W}$$

וההספק P_2 של הצרכן R_2 הוא

$$P_2 = I^2R_2 = 2^2 \times 60 = 4 \times 60 = 240\ \text{W}$$

ב. סכום הספקי הצרכנים הוא, לפי משוואה (5-8),

$$P_1 + P_2 = 200 + 240 = 440\ \text{W}$$

ג. מתח המקור הוא 220 V, וזרם המעגל הוא 2 A. הספק המקור הוא

$$P = IU = 2 \times 220 = 440\ \text{W}$$

אנו רואים כי הספק המקור שווה לסכום הספקי הצרכנים.



 **שאלות חזרה** 

שאלה 8-1

סמן את כל המשפטים הנכונים.

א. בכל הנקודות של מעגל טורי זורם אותו זרם.

ב. במעגל טורי אין מפל מתח על הנגדים.

ג. יחס הזרמים בנגדים במעגל טורי הוא כיחס ההתנגדויות של הנגדים.

ד. יחס המתחים על הנגדים במעגל טורי הוא כיחס ההתנגדויות של הנגדים.

שאלה 8-2

"לנגד יש התנגדות, ולכן הזרם היוצא מנגד, קטן מהזרם הנכנס לנגד."

נכון או לא?

הזרם הנכנס לנקודה, שאינה נקודת צומת ...

א. גדול מהזרם היוצא מנקודה זו.

ב. שווה לזרם היוצא מנקודה זו.

ג. קטן מהזרם היוצא מנקודה זו.

שאלה 8-4

כמה צמתים יש במעגל טורי?

שאלה 8-5

במעגל חשמלי יש מקור יחיד.

א. האם מתח המקור במעגל טורי, יכול להיות קטן מסכום המתחים על הנגדים במעגל?

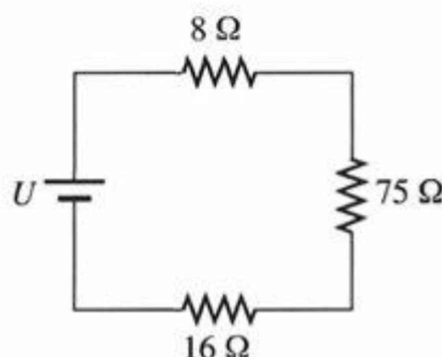
ב. האם מתח המקור במעגל טורי, יכול להיות גדול מהמתח על הנגד השקול של המעגל?

שאלה 8-6

"אם שני נגדים זהים מחוברים בטור במעגל טורי, המתח על כל אחד מהם שווה". נכון או לא?

שאלה 8-7

באיזה מהנגדים במעגל שבאיור 8-10 זורם הזרם הגדול ביותר? (סמן את התשובה הנכונה.)



איור 8-10

א. בנגד שהתנגדותו 8 Ω כי הוא הקרוב ביותר להדק החיובי של מקור המתח.

ב. בנגד שהתנגדותו היא הגדולה ביותר.

ג. בנגד שהתנגדותו 16 Ω, כי הוא הקרוב ביותר להדק השלילי של מקור המתח.

ד. בנגד שהתנגדותו 75 Ω, הרחוק ביותר ממקור המתח.

ה. בכל הנגדים זורם אותו זרם.

שאלה 8-8

מהי ההתנגדות השקולה של הנגדים במעגל שבאיור 8-10?

שאלה 8-9

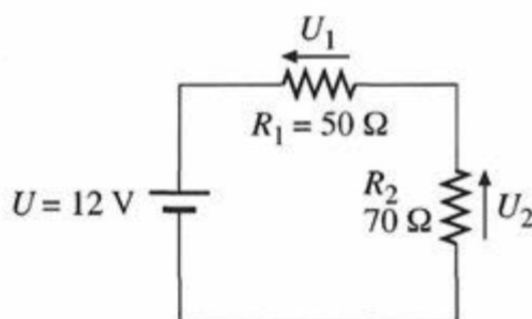
ההתנגדות השקולה של מעגל טורי היא 100 Ω. מתח המקור הוא 12 V. מה הזרם במעגל?

שאלה 8-10

ההתנגדות של מעגל טורי היא 50 Ω. הזרם במעגל הוא 2 A. מהו מתח המקור?

שאלה 8-11

חשב את המתח U_1 ואת המתח U_2 במעגל שבאיור 8-11.



איור 8-11

שאלה 8-12

חשב את הזרם במעגל שבדוגמה 8-3.

שאלה 8-13

"ההתנגדות השקולה של נגדים בטור – גדולה מכל אחת מההתנגדויות של הנגדים, המחוברים בטור." נכון או לא?

שאלה 8-14

שני צרכנים מחוברים בטור במעגל טורי. התנגדות צרכן אחד היא 16 Ω. והתנגדות הצרכן השני היא 24 Ω. מתח המקור הוא 12 V.

א. חשב את ההספק של כל צרכן.

ב. חשב את סכום הספקי הצרכנים.

ג. מהו הספק המקור?

שאלה 8-15

שני נגדים, R_1 ו-R_2, מחוברים בטור, כמתואר באיור 8-8. נתון כי $R_1 = 10\ \Omega$ ו-$R_2 = 20\ \Omega$.

הראה כי הספק הנגד R_2 גדול פי 2 מהספק הנגד R_1.

שאלה 8-16

עשרה נגדים זהים מחוברים בטור למקור מתח של 12 V. הזרם במעגל הוא 0.2 A.

א. מהי ההתנגדות של כל נגד?

ב. מהו ההספק של כל נגד?

ג. חשב את הספק המקור ואת סכום ההספקים של הנגדים.

שאלה 8-17

שני נגדים, R_1 ו-R_2, מחוברים בטור למקור מתח U, כמתואר באיור 8-8. הזרם במעגל הוא I. סמן את כל הטענות הנכונות.

א. ההספק P_1 של הנגד R_1 הוא $P_1 = I^2 R_1$.

ב. ההספק P_2 של הנגד R_2 הוא $P_2 = \dfrac{U^2}{R_1 + R_2}$.

ג. סכום הספקי הנגדים הוא UI.

ד. סכום הספקי הנגדים הוא $\dfrac{U^2}{R_1 + R_2}$.

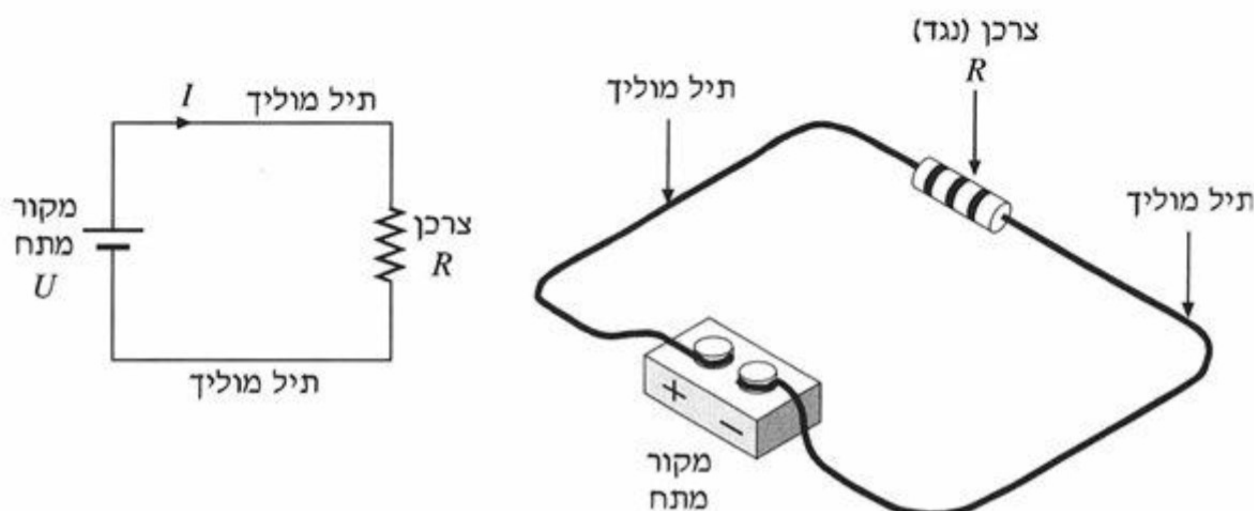
ה. סכום הספקי הנגדים הוא $I^2(R_1 + R_2)$.

ו. סכום הספקי הנגדים הוא $\dfrac{U}{(R_1 + R_2)^2}$.

ז. סכום הספקי הנגדים הוא $I\,(R_1 + R_2)^2$.

8.2 התנגדות הקו

באיור 8-12 אנו רואים מעגל, שבו מקור המתח מחובר לצרכן (נגד) R באמצעות תֵּילִים מוליכים ("חוטי חשמל"). תרשים המעגל מובא באיור 8-13. למדנו לפתור מעגל כזה, ועד כה הנחנו – לצורך הפתרון – כי התנגדות התֵּילִים המוליכים שווה לאפס.



איור 8-12 מעגל שבו מקור מתח מחובר לצרכן באמצעות תֵּילִים מוליכים

איור 8-13 תרשים המעגל שמימין

האם תמיד ראוי להניח, שההתנגדות של התֵּילִים המוליכים שווה לאפס? בדרך-כלל, התֵּילִים המוליכים עשויים מחומר מוליך בעל התנגדות סגולית קטנה (לדוגמה: נחושת), והתנגדותם קטנה מאוד ביחס להתנגדות של הצרכנים במעגל. אם-כן, לרוב אין צורך להתחשב בהתנגדות התֵּילִים המוליכים, כאשר פותרים את המעגל. אבל עלינו לזכור כי ההתנגדות של התֵּילִים המוליכים אינה אפס, ולפעמים יש להתחשב בה. נבהיר זאת.

למדנו כי ככל שתיל מוליך ארוך יותר, התנגדותו גדולה יותר. אם במעגל חשמלי יש תֵּילִים ארוכים, אין להזניח את התנגדות התֵּילִים, ויש להתחשב בה, כשפותרים את המעגל. התנגדות התֵּילִים נקראת **התנגדות הקו**, ובמעגל טורי היא שווה לסכום ההתנגדויות של התֵּילִים המוליכים. כאשר מתחשבים בהתנגדות הקו, מתייחסים לתיל המוליך - כאילו היה נגד. נסמן כאן על-ידי R_1 את סכום ההתנגדויות של התֵּילִים המוליכים.

המטענים, הנעים במעגל, צריכים להתגבר על התנגדות הנגד R וכן על התנגדות הקו R_1. מכאן שסכום ההתנגדויות במעגל זה, הוא הסכום של התנגדות הנגד והתנגדות הקו. לכן נסיק כי הנגד והתֵּילִים המוליכים מחוברים בטור.

ראינו כי ההתנגדות השקולה של נגדים בטור, גדולה מהתנגדות כל אחד מהנגדים. מכאן שההתנגדות השקולה של הצרכן R והנגד הנוסף R_1, המחוברים בטור, גדולה מהתנגדות הצרכן. כלומר, ההתנגדות השקולה $R_1 + R$ של המעגל שבאיור 8-13, גדולה מהתנגדות הצרכן.

בדומה להתנגדות כל נגד, התנגדות הקו (כלומר: התנגדות התֵיִלים המוליכים) תלויה בדברים הבאים:

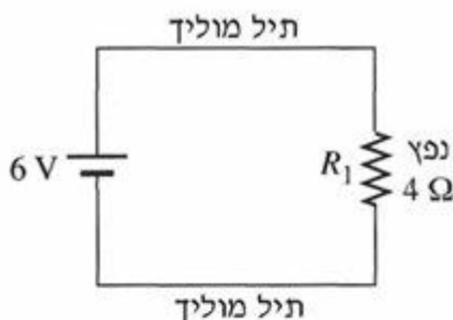
- אורך התֵיִלים המוליכים;
- שטח החתך של התֵיִלים המוליכים;
- החומר שממנו עשויים התֵיִלים המוליכים (כלומר: ההתנגדות הסגולית שלהם);
- הטמפרטורה של התֵיִלים המוליכים.



דוגמה 8-5

כדי לפרוץ דרך בסלע, משתמשים בנַפָּץ חשמלי. הפעלת הנפץ נעשית ממרחק, מטעמי בטיחות (כדי למנוע פגיעה במפעיל הנפץ). התנגדות הנפץ היא $4\ \Omega$. הנפץ מחובר למקור מתח של $6\ V$, באמצעות תֵיִלים מוליכים העשויים נחושת, ששטח החתך שלהם קבוע.

התנגדות התיל המוליך, המחובר בין ההדק החיובי של מקור המתח לבין הנפץ – $1\ \Omega$. תיל שני, באותו אורך, מחבר את הנפץ להדק השלילי של מקור המתח. המעגל החשמלי המתאים מתואר באיור 8-14.



איור 8-14 מקור מתח מחובר לנפץ באמצעות תֵיִלים מוליכים

א. מהי התנגדות הקו?

ב. חשב את התנגדות המעגל.

ג. חשב את הזרם במעגל.

ד. מה היה הזרם במעגל, אילו לתֵיִלים המוליכים לא הייתה התנגדות?

פתרון

א. תיל מוליך אחד מחבר את ההדק החיובי של מקור המתח אל הנפץ, ותיל מוליך שני מחבר את הנפץ להדק השלילי של מקור המתח. נתון כי לשני התֵילִים אותו אורך, אותו שטח חתך, והם עשויים מאותו חומר (נחושת). מכאן נקבל כי לשני התֵילִים יש אותה התנגדות. נתון כי התנגדות אחד התֵילִים היא $1\ \Omega$. נסמן כאן על-ידי R_2 את ההתנגדות השקולה של שני התילים, המחוברים בטור. נקבל אפוא כי התנגדות שני התֵילִים היא $R_2 = 2\ \Omega$. זוהי התנגדות הקו.

ב. הנפץ מחובר בטור לתֵילִים המוליכים, וההתנגדות השקולה שלהם (כלומר, התנגדות המעגל) R_{eq} היא

$$R_{eq} = R_1 + R_2 = 4 + 2 = 6\ \Omega$$

ג. הזרם במעגל נתון על-ידי

$$I = \frac{U}{R_{eq}}$$

נציב את הנתונים, ונקבל:

$$I = \frac{6\ \text{V}}{6\ \Omega} = 1\ \text{A}$$

ד. אילו לתֵילִים המוליכים לא הייתה התנגדות, ההתנגדות היחידה במעגל הייתה התנגדות הנפץ. במקרה זה, הזרם במעגל היה

$$I = \frac{6\ \text{V}}{4\ \Omega} = 1.5\ \text{A}$$

אנו רואים כי אילו התֵילִים היו חסרי התנגדות, הזרם במעגל היה $1.5\ \text{A}$ במקום $1\ \text{A}$.



להתנגדות הקו יש חשיבות רבה במיוחד בקווי המתח, שבין תחנת-הכוח לבין הצרכנים. קווים אלה נמתחים לאורך עשרות קילומטרים, כי לא כל הצרכנים נמצאים ליד תחנת-הכוח. קווים אלה הם "הבזבזן" הגדול של האנרגיה החשמלית, העוברת ממקום ייצורה (כלומר, מתחנת-הכוח) עד הצרכנים.



דוגמה 8-6

חשב את הספק הנפץ ואת הספק התֵּילִים המוליכים במעגל שתואר בדוגמה 8-5.

פתרון

בדוגמה 8-5 נתון כי התנגדות הנפץ היא $R_1 = 4\ \Omega$. בסעיף ג של הפתרון מצאנו, כי הזרם במעגל הטורי (ולכן גם הזרם בנפץ, המחובר במעגל זה) הוא $I = 1\ \text{A}$. למדנו כי ההספק של נגד נתון על-ידי משוואה (6-3):

$$P = I^2R$$

מכאן נקבל כי ההספק P_1 של הנפץ הוא

$$P_1 = I^2R_1 = 1^2 \times 4 = 1 \times 4 = 4\ \text{W}$$

התנגדות התֵּילִים המוליכים היא $R_2 = 2\ \Omega$, וההספק שלהם הוא

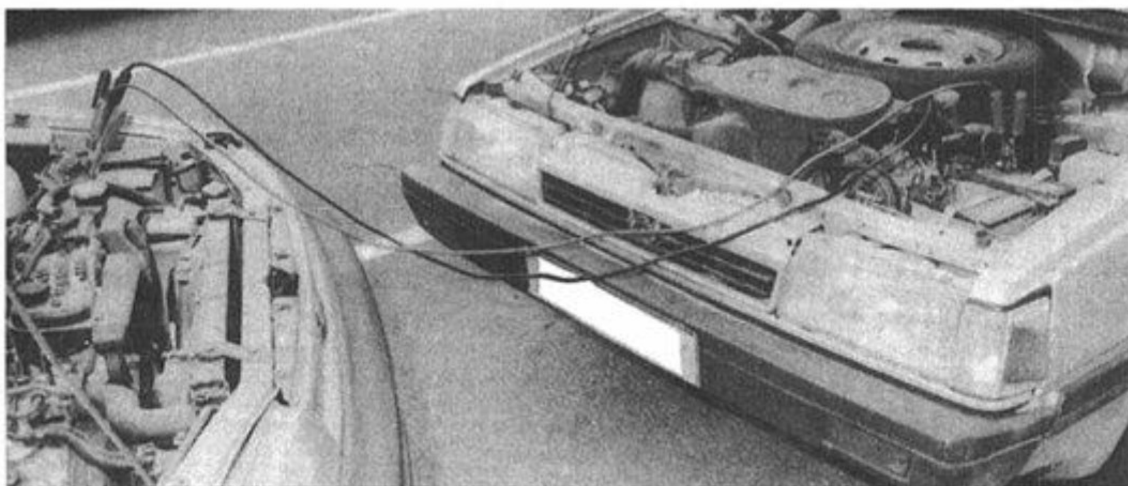
$$P_2 = I^2R_2 = 1^2 \times 2 = 1 \times 2 = 2\ \text{W}$$

אנו רואים כי ההספק, המתבזבז בתֵּילִים המוליכים ($P_2 = 2\ \text{W}$), שווה למחצית ההספק הנמסר לנפץ ($P_1 = 4\ \text{W}$).



התנעת מכונית בעזרת כבלים

לא פעם אנו רואים בשולי הכביש שתי מכוניות, העומדות זו מול זו (איור 8-15), כשמכסה המנוע של כל מכונית מורָם, והמצברים של שתי המכוניות מחוברים באמצעות כבלים (הנקראים גם כבלי התנעה).



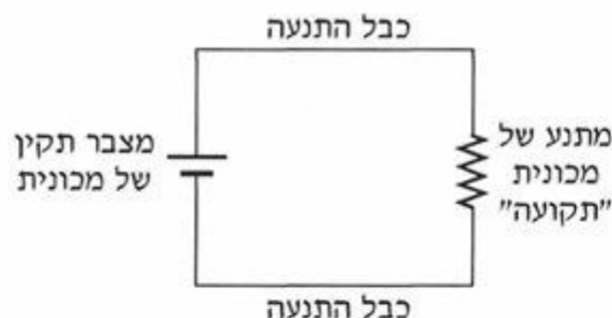
איור 8-15 התנעת מכונית באמצעות מצבר וכבלים

יש שני סוגים עיקריים של כבלים להתנעת מכוניות: כבלים דקים וכבלים עבים. נבדוק באיזה סוג עדיף להשתמש להתנעת מכונית.

התנעת מכונית נעשית על-ידי מצבר, שהוא התקן המפריד מטענים. את המצבר אפשר לטעון שוב ושוב, כאשר הוא "מתרוקן". אם מצבר מכונית "מתרוקן", ואין טוענים אותו, המכונית "נתקעת"; כי כדי שהמתנע ("סטרטר"; starter) של המכונית יוכל להתניע את מנוע המכונית, יש לחבר את המתנע למצבר תקין.

נניח כי נהג השאיר בטעות את אורות מכוניתו דלוקים, ומצבר המכונית "התרוקן". במקרה כזה, אפשר לחזור ולטעון את המצבר בדרך זו: בעזרת כבלים, מחברים את מתנע המכונית למצבר תקין של מכונית אחרת. (למעשה, מחברים את הכבלים להדקי המצבר של המכונית התקועה, כי אלה נקודות החיבור למתנע.) המתנע מתניע את המנוע, והמכונית יכולה לנסוע. תוך כדי נסיעה, המצבר שהתרוקן - נטען מחדש.

המעגל החשמלי המתקבל – מתואר באיור 8-16. אנו מתעלמים אפוא מהמצבר "שהתרוקן" במכונית התקועה, ומניחים שהוא נתק. המתנע הוא הצרכן במעגל זה, וכבלי ההתנעה הם התַיִלים המוליכים. ככל שהכבלים עבים יותר, התנגדות הקו קטנה יותר, ואז המתח המגיע להדקי המתנע – גדול יותר, ויש סיכוי טוב יותר להתניע את המכונית.



איור 8-16 כבלי התנעה מחברים מתנע של מכונית תקועה – למצבר תקין של מכונית אחרת

המסקנה היא שעדיף להשתמש בכבלים עבים להתנעת מכונית, שהמצבר שלה "התרוקן". אגב, אם משתמשים בכבל דק מדי לצורך התנעה, עלול הכבל להינתך בגלל הזרם הגבוה (100 A ויותר).

 **שאלות חזרה** 

שאלה 8-18

כאשר מתחשבים בהתנגדות הקו, מתייחסים לתיל המוליך כאילו היה:

א. נגד
ב. מבדד
ג. מקור מתח
ד. נתק

שאלה 8-19

סמן את הגורמים, שבהם תלויה התנגדות הקו (בהנחה שטמפרטורת הקו קבועה).

א. אורך התֵילים המוליכים.
ב. התנגדות הצרכן, המחובר בטור לתֵילים המוליכים.
ג. שטח החתך של התֵילים המוליכים.
ד. מתח מקור המתח, המחובר לצרכן באמצעות התֵילים המוליכים.
ה. ההתנגדות הסגולית של התֵילים המוליכים.
ו. הזרם במעגל, שבו נמצאים התֵילים המוליכים.

שאלה 8-20

מקור מתח של $12\ V$ מחובר לצרכן, $R = 50\ \Omega$, באמצעות תֵילים מוליכים, כמתואר באיור 8-13.

א. הראה כי הזרם במעגל לא יוכל להיות גדול מ-$0.24\ A$.
ב. מה הזרם במעגל, אם התנגדות הקו היא $1\ \Omega$?

שאלה 8-21

רמקול, שהתנגדותו $8\ \Omega$, מחובר למקור מתח של $12\ V$. המרחק בין הרמקול למקור המתח – 10 מטר. ההתנגדות של כל מטר של התיל המוליך – היא $0.1\ \Omega$.

א. חשב את התנגדות הקו, בהנחה כי התֵילים המוליכים ישרים.
ב. חשב את התנגדות המעגל (התנגדות הרמקול והתנגדות הקו).

שאלה 8-22

רמקול, שהתנגדותו $16\ \Omega$, מחובר למקור מתח של $12\ V$.

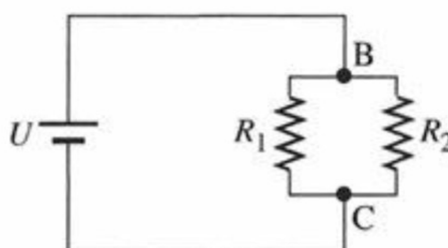
מה התנגדות הקו, כשהמתח על הרמקול הוא $11\ V$?

שאלה 8-23

מקור מתח של 12 V מחובר לצרכן, $R = 50\ \Omega$, באמצעות תֵּילִים מוליכים. התנגדות הקו היא 0.5 Ω. חשב את הספק הצרכן ואת הספק הקו.

8.3 חיבור נגדים במקביל

עד כה למדנו לזהות נגדים המחוברים בטור, ולחשב את התנגדותם השקולה. עכשיו נלמד צורה נוספת של חיבור נגדים. לשם כך נסתכל במעגל שבאיור 8-17.



איור 8-17 חיבור נגדים במקביל

במעגל זה יש שתי נקודות צומת: B ו-C. הנגד R_1 מחובר בקצהו האחד לנקודת הצומת B, ובקצהו השני - לנקודת הצומת C. גם הנגד R_2 מחובר לנקודות הצומת B ו-C. כלומר, קצה אחד של כל אחד מן הנגדים R_1 ו-R_2 מחובר לנקודת הצומת B, והקצה השני של כל אחד מהם – מחובר לנקודת הצומת C.

חיבור כזה של נגדים נקרא **חיבור במקביל**; והנגדים, במקרה זה, **מחוברים במקביל**. מעגל חשמלי, שבו כל הנגדים מחוברים במקביל, נקרא **מעגל מקבילי**.

בדיוננו זה הנחנו כי התנגדות התֵּילִים המוליכים ניתנת להזנחה. לולא כן, היינו מקבלים כי המעגל שבאיור 8-17 אינו מעגל מקבילי. במעגל מסוג זה (שאינו טורי ואינו מקבילי), נדון בהמשך.

כאמור, הנגדים R_1 ו-R_2 במעגל שבאיור 8-17 – מחוברים לאותן נקודות B ו-C. בין שתי הנקודות יש מתח מסוים, ולכן המתח שווה על שני הנגדים האלה. מכאן נסיק כי המתח שווה על נגדים, המחוברים במקביל. במעגל מקבילי – המתח על כל אחד מהנגדים, שווה גם למתח המקור.

ההתנגדות השקולה של שני נגדים המחוברים במקביל

כבר למדנו לחשב את ההתנגדות השקולה של נגדים המחוברים בטור. עכשיו נחשב את ההתנגדות השקולה של שני נגדים המחוברים במקביל.

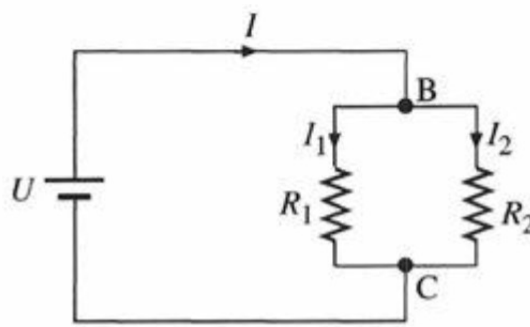
באיור 8-18 מופיע מעגל, ובו שני נגדים המחוברים במקביל. באיור 8-19 מופיע מעגל, שבו מחובר נגד R_{eq} בין הנקודות B ו-C. התנגדות הנגד R_{eq} שקולה להתנגדות שני הנגדים המחוברים במקביל. מתח המקור U שווה בשני המעגלים האלה.

כדי שההתנגדות R_{eq} – במעגל שבאיור 8-19 – תהיה ההתנגדות השקולה של שני הנגדים במעגל שבאיור 8-18, חייבות להתקיים שתי דרישות:

א. הזרם I בשני המעגלים יהיה אותו זרם;

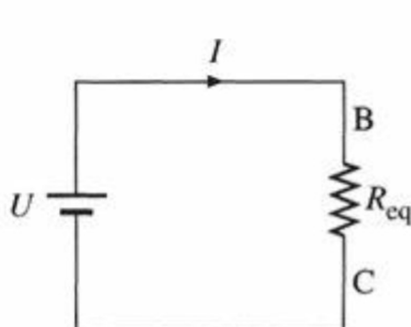
ב. המתח בין הנקודות B ו-C בשני המעגלים – יהיה אותו מתח.

כדי למצוא את ההתנגדות השקולה, נחשב תחילה את הזרם בכל אחד מהנגדים שבאיור 8-18. שני הנגדים מחוברים במקביל במעגל מקבילי, ולכן המתח על כל אחד מהנגדים שווה למתח המקור U.



איור 8-18

מעגל מקבילי ובו שני נגדים: R_1 ו-R_2



איור 8-19

מעגל ובו נגד שקול לשני הנגדים R_1 ו-R_2, המחוברים במקביל

לפי חוק אום, הזרם I_1 בנגד R_1 – במעגל שבאיור 8-18 – נתון על-ידי

$$I_1 = \frac{U}{R_1}$$

והזרם I_2 נתון על-ידי

$$I_2 = \frac{U}{R_2}$$

ראינו כי הנקודה B במעגל שבאיור 8-18 – היא צומת. סכום הזרמים, הנכנסים לצומת זה, הוא I; וסכום הזרמים, היוצאים מצומת זה, הוא $I_1 + I_2$. לפי חוק הזרמים של קירכהוף, נקבל כי

$$I = I_1 + I_2$$

נציב במשוואה האחרונה את הביטויים של I_1 ושל I_2, ונקבל:

$$I = I_1 + I_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$$

נוציא את U מחוץ לסוגריים, ונקבל כי

$$I = U\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$$

עתה נתבונן במעגל שבאיור 8-19. נניח כי הנגד R_{eq} במעגל זה – הוא אכן הנגד השקול לשני הנגדים R_1 ו-R_2, המחוברים במקביל במעגל שבאיור 8-18. לפי חוק אום, הזרם במעגל זה הוא

$$I = \frac{U}{R_{eq}}$$

אם R_{eq} היא ההתנגדות השקולה, כי אז לפי ההגדרה של ההתנגדות השקולה, הזרם I והמתח U במעגל השקול (שבאיור 8-19) שווים לזרם I ולמתח U במעגל המקורי (שבאיור 8-18). כלומר: I ו-U שווים בשתי המשוואות האחרונות שקיבלנו.

לכן נוכל לרשום:

$$\frac{U}{R_{eq}} = U\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$$

נצמצם ב-U את שני האגפים במשוואה האחרונה ונקבל:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \qquad (8\text{-}6)$$

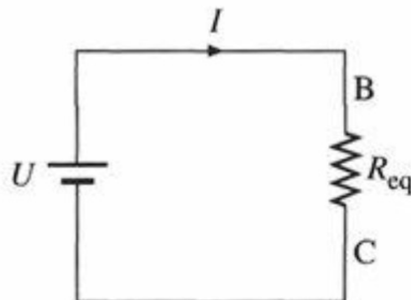
באמצעות המשוואה האחרונה נוכל לחשב את ההתנגדות השקולה של שני נגדים במקביל, אם נדע את ההתנגדות של כל אחד מנגדים אלה.



דוגמה 8-7

במעגל שבאיור 8-20 מחוברים שני נגדים במקביל:

$R_2 = 4\ \Omega$,$R_1 = 3\ \Omega$.



איור 8-20 מעגל ובו שני נגדים מחוברים במקביל

א. חשב את ההתנגדות השקולה של שני הנגדים.

ב. סרטט מעגל, שבו מחובר הנגד השקול במקום שני הנגדים.

פתרון

א. את ההתנגדות השקולה של שני נגדים במקביל – נחשב בעזרת משוואה (8-6):

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

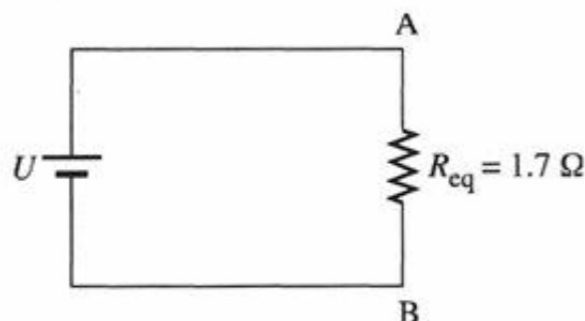
נציב במשוואה זו את ערכי הנגדים, ונקבל:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{3} + \frac{1}{4} = \frac{4+3}{12} = \frac{7}{12}$$

ומכאן נקבל כי $R_{eq} = 1.7\ \Omega$.

ההתנגדות השקולה של שני הנגדים – היא $1.7\ \Omega$.

ב. באיור 8-21 מסורטט מעגל, שבו מחובר הנגד השקול R_{eq} במקום שני הנגדים שבאיור 8-20.



איור 8-21 הנגד השקול R_{eq} מחובר במקום שני הנגדים שבאיור 8-20



בדוגמה האחרונה חישבנו תחילה את $\frac{1}{R_{eq}}$, ורק אז מצאנו את R_{eq}. עכשיו נמצא משוואה, שבאמצעותה נוכל לחשב מיד את ההתנגדות השקולה של שני נגדים, בלי שנצטרך לחשב תחילה את $\frac{1}{R_{eq}}$. לשם כך נרשום שוב את המשוואה, שבאמצעותה חישבנו את ההתנגדות השקולה:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

נרשום מכנה משותף באגף ימין של המשוואה:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_2 + R_1}{R_1 R_2}$$

ונקבל:

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

מכאן שההתנגדות השקולה של שני נגדים במקביל – נתונה על-ידי

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \qquad (8\text{-}7)$$

ובמילים: ההתנגדות השקולה של שני נגדים במקביל – שווה למכפלת ההתנגדויות מחולקת בסכום ההתנגדויות.



דוגמה 8-8

חזור וחשב – באמצעות משוואה (8-7) את ההתנגדות השקולה של שני הנגדים – $R_1 = 3\ \Omega$, $R_2 = 4\ \Omega$ – המחוברים במקביל.

פתרון

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{3 \times 4}{3 + 4} = \frac{12}{7} = 1.7\ \Omega$$

שוב קיבלנו כי ההתנגדות השקולה היא $1.7\ \Omega$.



בשתי הדרכים קיבלנו כי ההתנגדות השקולה של שני הנגדים $R_1 = 3\ \Omega$, $R_2 = 4\ \Omega$, המחוברים במקביל, היא $1.7\ \Omega$. אנו רואים, שההתנגדות השקולה של שני הנגדים קטנה מההתנגדות של כל אחד מהנגדים. תוצאה זו אינה מקרית. אפשר להראות כי

ההתנגדות השקולה של נגדים במקביל קטנה מכל אחת מההתנגדויות של הנגדים המחוברים במקביל.



דוגמה 8-9

שני נגדים מחוברים במקביל. התנגדות אחד הנגדים היא $100\ \Omega$, והתנגדות הנגד השני – $50\ \Omega$. האם ההתנגדות השקולה שלהם יכולה להיות גדולה מ-$60\ \Omega$?

פתרון

לא. ההתנגדות השקולה של שני הנגדים – $100\ \Omega$ ו-$50\ \Omega$ – חייבת להיות קטנה מ-$50\ \Omega$, ולכן אינה יכולה להיות גדולה מ-$60\ \Omega$.



עד כה מצאנו את ההתנגדות השקולה של שני נגדים במקביל. ההתנגדות השקולה של שלושה נגדים במקביל נתונה על-ידי

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \qquad (8\text{-}8)$$

הביטוי $\frac{1}{R}$ נקרא **ההופכי של ההתנגדות *R***. מכאן שההופכי $\frac{1}{R_{eq}}$ של ההתנגדות השקולה R_{eq}, שווה לסכום ההופכיים של ההתנגדויות המחוברות במקביל.

גם במקרה של שלושה נגדים ניתן לקבל משוואה, שבעזרתה אפשר לחשב מיד את R_{eq}, בלי לחשב תחילה את ההופכי $\frac{1}{R_{eq}}$. אבל במקרה זה, המשוואה המתקבלת מסובכת למדי.

נוכל לחשב את ההתנגדות השקולה R_{eq} של שלושה נגדים, המחוברים במקביל, גם בדרך נוספת: תחילה נחשב את ההתנגדות השקולה $R_{1,2}$ של שני הנגדים R_1 ו-R_2, המחוברים במקביל. בשלב השני נחשב שוב את ההתנגדות השקולה של שני נגדים: הנגד $R_{1,2}$ והנגד R_3. אם-כן, ההתנגדות השקולה R_{eq} של שלושת הנגדים במקביל – נתונה על-ידי

$$\frac{1}{R_{eq}}=\frac{1}{R_{1,2}}+\frac{1}{R_3}$$

לפנינו אפוא שני נגדים המחוברים במקביל: $R_{1,2}$ ו-R_3. לפי הסברנו הקודם, ההתנגדות השקולה R_{eq} של שתי ההתנגדויות $R_{1,2}$ ו-R_3, המחוברות במקביל, קטנה מכל אחת מההתנגדויות הללו, ולכן R_{eq} קטנה מ-$R_{1,2}$. נוכל להסיק באופן כללי כי

כאשר מוסיפים נגד במקביל לקבוצת נגדים במעגל חשמלי, ההתנגדות השקולה של קבוצת הנגדים החדשה – קטנה מזו של קבוצת הנגדים המקורית.

כאשר נתונים שלושה נגדים זהים (כלומר: $R_1=R_2=R_3=R$) המחוברים במקביל, נחשב את התנגדותם השקולה בדרך זו:

$$\frac{1}{R_{eq}}=\frac{1}{R}+\frac{1}{R}+\frac{1}{R}=\frac{3}{R}$$

ומכאן:

$$R_{eq}=\frac{R}{3}$$

באופן כללי, כאשר מספר הנגדים הזהים המחוברים במקביל הוא n, כך שהתנגדות כל אחד מהם – R, ההתנגדות השקולה שלהם היא

$$R_{eq}=\frac{R}{n} \qquad (8\text{-}9)$$



דוגמה 8-10

נתונים עשרה נגדים המחוברים במקביל. התנגדות כל נגד היא $50\ \Omega$. מהי ההתנגדות השקולה שלהם?

פתרון

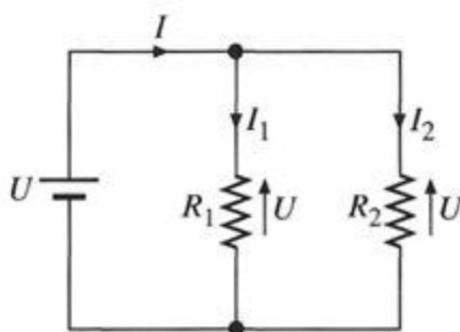
נתונים עשרה נגדים, כלומר: $n=10$. התנגדות כל נגד היא $50\ \Omega$. הנגדים מחוברים במקביל, ומכאן שההתנגדות השקולה שלהם היא, לפי משוואה (8-9)

$$R_{eq}=\frac{R}{n}=\frac{50}{10}=5\ \Omega$$



הקשר בין הזרמים בנגדים המחוברים במקביל

ראינו כי כאשר נגדים מחוברים במקביל, על כל אחד מהנגדים יש אותו מתח. עתה נמצא מהו הקשר בין הזרמים בנגדים, המחוברים במקביל, להתנגדויות של נגדים אלה. לשם כך נסתכל במעגל שבאיור 8-22. במעגל זה מסומנים הזרמים, המתחים וההתנגדויות של שני נגדים, המחוברים במקביל.



איור 8-22 סימון המתחים, הזרמים וההתנגדויות של שני נגדים, המחוברים במקביל

ניווכח להלן כי הקשר בין הזרמים בנגדים, המחוברים במקביל, לבין התנגדויות הנגדים הוא

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{R_2}{R_1} \qquad (8\text{-}10)$$

כאשר I_1 הוא הזרם בנגד R_1, ו-I_2 הוא הזרם בנגד R_2.

כלומר:

היחס בין הזרמים בנגדים, המחוברים במקביל, ***הפוך*** *ליחס בין ההתנגדויות של נגדים אלה.*

כדי להיווכח בנכונות הקשר, נסתכל שוב במעגל המקבילי שבאיור 8-22. למדנו שהמתח על כל אחד מהנגדים במעגל זה הוא U. נשתמש בחוק אום לגבי כל אחד מהנגדים:

הזרם I_1 נתון על-ידי

$$I_1=\frac{U}{R_1}$$

והזרם I_2 נתון על-ידי

$$I_2=\frac{U}{R_2}$$

מכאן נקבל כי

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{\frac{U}{R_1}}{\frac{U}{R_2}}=\frac{R_2}{R_1}$$

אכן קיבלנו שיחס הזרמים בנגדים, המחוברים במקביל, **הפוך** ליחס ההתנגדויות של נגדים אלה.

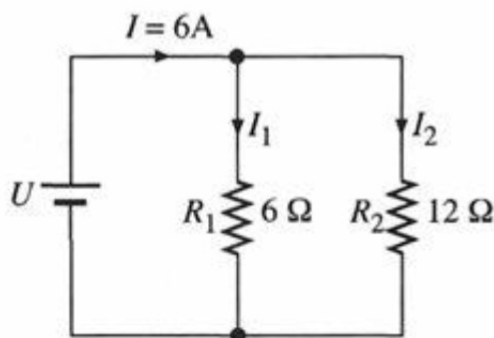




דוגמה 8-11

א. חשב את הזרמים I_1 ו-I_2 במעגל שבאיור 8-23.

ב. מהו מתח המקור במעגל זה?



איור 8-23 מעגל מקבילי

פתרון

א. הנגדים R_1 ו-R_2 מחוברים במקביל, לכן יחס הזרמים בנגדים הפוך ליחס התנגדויות הנגדים, ולכן – לפי משוואה (8-10),

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{R_2}{R_1}=\frac{12}{6}=2$$

כלומר,

$$I_1=2I_2$$

אבל לפי חוק הזרמים של קירכהוף, מקבלים כי

$$I=I_1+I_2=6\text{ A}$$

נציב $2I_2$ במקום I_1 במשוואה האחרונה, ונקבל כי

$$I=I_1+I_2=2I_2+I_2=3I_2=6\text{ A}$$

ומכאן:

$$I_2=\frac{6}{3}=2\text{ A}$$

והזרם I_1 הוא

$$I_1 = 2I_2 = 2 \times 2 = 4\ \text{A}$$

* * *

אגב, אפשר לחשב תחילה את ההתנגדות השקולה של המעגל; את מתח המקור; ואת הזרם בכל נגד.

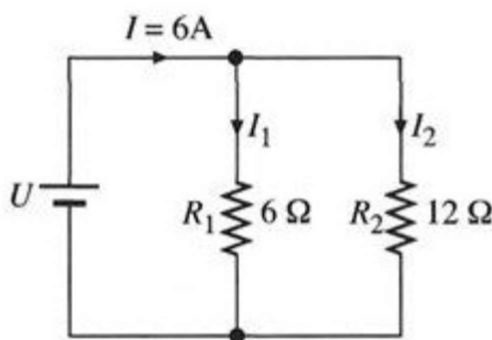
ב. מאחר שהמעגל מקבילי, מתח המקור שווה למתח על כל אחד מהנגדים. לכן

$$U = I_1R_1 = 4 \times 6 = 24\ \text{V}$$



הקשר בין הספק המקור להספקי הצרכנים במעגל מקבילי

למדנו כי במעגל טורי – סכום ההספקים של הצרכנים שווה להספק המקור. נבדוק אם כך הדבר גם במעגל מקבילי. לשם כך, נסתכל במעגל שבאיור 8-24. זהו מעגל מקבילי, שבו הצרכנים R_1 ו-R_2 מחוברים במקביל. לכן המתח U על כל אחד מהצרכנים שווה למתח המקור.



איור 8-24 שני צרכנים במעגל מקבילי

הספק הצרכן R_1 הוא $P_1 = UI_1$, והספק הצרכן R_2 הוא $P_2 = UI_2$. הספק המקור (הנקרא גם הספק המעגל) הוא $P = UI$. נמצא את הקשר בין שלושת ההספקים האלה.

לפי חוק הזרמים של קירכהוף, $I = I_1 + I_2$. אם-כן, נוכל לרשום את הספק המקור בצורה

$$P = UI = U(I_1 + I_2) = UI_1 + UI_2 = P_1 + P_2$$

כלומר,

$$P = P_1 + P_2$$

קיבלנו כי

במעגל מקבילי – הספק המקור שווה לסכום הספקי הצרכנים.

תוצאה זו נכונה לכל מספר של צרכנים, המחוברים במקביל במעגל מקבילי.



דוגמה 8-12

נורה ותנור חימום מחוברים במקביל למקור מתח של 230 V. על הנורה רשום 230V/75W, והתנגדות התנור בעת פעולתו היא 30 Ω.
מהו ההספק שמספק המקור למעגל?

פתרון

המתח על הנורה שווה למתח המקור, כי המעגל מקבילי. מכאן שהספק הנורה (P_1) הוא ההספק הרשום עליה: $P_1 = 75$ W. עכשיו נחשב את הספק התנור (P_2):

$$P_2 = UI_2 = \frac{U^2}{R_2} = \frac{230^2}{30} = \frac{52{,}900}{30} = 1763.3 \text{ W}$$

ההספק P, שמספק המקור למעגל המקבילי, שווה לסכום ההספקים של הצרכנים. לכן ההספק, שמספק המקור, הוא

$$P = P_1 + P_2 = 75 \text{ W} + 1763.3 \text{ W} = 1838.3 \text{ W}$$



לחיבור צרכנים במקביל – יש שימושים רבים. זוהי צורת החיבור, שמשתמשים בה בדרך-כלל בבתים פרטיים ובמפעלים. הסיבות העיקריות לכך, שמעדיפים לחבר את הצרכנים במקביל, הן:

- כאשר מחברים במקביל צרכן נוסף במעגל מקבילי, המתח והזרם בכל אחד מהצרכנים האחרים – אינם משתנים. נסביר זאת:

המתח על כל צרכן במעגל מקבילי, שווה למתח המקור. אם מתח המקור אינו משתנה, גם המתח על כל צרכן אינו משתנה. לפי חוק אום, הזרם בצרכן נקבע רק על-ידי המתח עליו והתנגדותו. מכאן שאם המתח על הצרכן אינו משתנה, גם הזרם דרכו אינו משתנה.

- כאשר אחד הצרכנים במעגל מקבילי מתקלקל, וזרם אינו יכול לעבור דרכו (למשל, כאשר נורה "נשרפת"), שאר הצרכנים יכולים להמשיך לפעול כרגיל.

לעומת זאת, אם נחבר צרכן נוסף בטור במעגל טורי, הזרם במעגל (כלומר, הזרם בכל אחד מהצרכנים) יקטן. נסביר זאת:

הוספת צרכן בטור מגדילה את התנגדות המעגל כולו, וכתוצאה מכך, הזרם במעגל – קָטֵן. גם מפל המתח על כל צרכן יהיה קטן יותר במעגל טורי כזה. כידוע, לצרכנים רבים דרוש מתח מסוים וזרם מסוים כדי שיפעלו בצורה תקינה, לכן הוספת צרכן בטור – יכולה להפריע לפעולתם התקינה של הצרכנים.

מלבד זאת, במעגל טורי – אם אחד הצרכנים מתקלקל, נוצר נתק במעגל, ושאר הצרכנים אינם יכולים להמשיך לפעול.

בטבלה 8-1 נתונה השוואה בין מעגל טורי למעגל מקבילי.

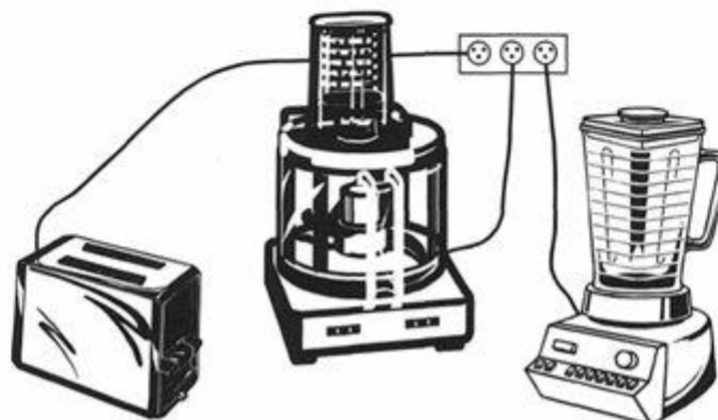
הגודל הפיסיקלי	**מעגל טורי**	**מעגל מקבילי**
מתח	יכול להיות שונה עם כל נגד	שווה על כל אחד מהנגדים
זרם	שווה בכל הנגדים	יכול להיות שונה בכל נגד
התנגדות שקולה של המעגל	– גדולה מכל אחת מההתנגדויות של הנגדים במעגל – שווה לסכום ההתנגדויות של הנגדים – עבור שני נגדים R_1, R_2: $R_{eq}=R_1+R_2$	– קטנה מכל אחת מההתנגדויות של הנגדים במעגל – הערך ההופכי של ההתנגדות השקולה ($\frac{1}{R_{eq}}$) שווה לסכום הערכים ההופכיים של התנגדויות הנגדים. – עבור שני נגדים R_1, R_2: $\frac{1}{R_{eq}}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}$
הספק המעגל	שווה לסכום ההספקים של הנגדים	שווה לסכום ההספקים של הנגדים

טבלה 8-1 השוואה בין מעגל טורי למעגל מקבילי

דוגמאות מעשיות לחיבור צרכנים

חיבור הצרכנים בביתנו

ראינו את היתרונות של חיבור צרכנים במקביל. ואכן בביתנו אנו מנצלים יתרונות אלה, והמכשירים החשמליים השונים בבית – מחוברים במקביל. משום כך, גם כאשר אנו מפעילים כמה מכשירים בבת-אחת, המתח על כל מכשיר ממשיך להיות מתח הרשת, ולכן גם הזרם בכל מכשיר אינו משתנה, והמכשירים יכולים לפעול בצורה תקינה.

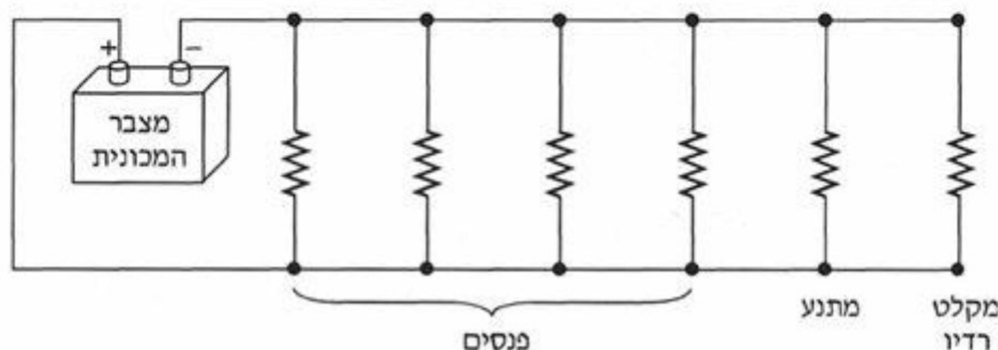


איור 8-25 מכשירים חשמליים ביתיים המחוברים במקביל

אנו יודעים גם, שכאשר אחד המכשירים בבית מתקלקל (למשל, כאשר נורה "נשרפת", או כאשר יש תקלה באחד המכשירים החשמליים שבאיור 8-25), שאר המכשירים בבית – ממשיכים לפעול כרגיל.

מערכת החשמל במכונית

גם הצרכנים במכונית מחוברים במקביל למצבר המכונית. וגם במכונית, אם פנס "נשרף", שאר הצרכנים ממשיכים לפעול ללא שינוי. לדוגמה, שאר הפנסים של המכונית ממשיכים להאיר, גם לאחר שפנס אחד "נשרף". באיור 8-26 נתון תרשים של מערכת החשמל במכונית.



איור 8-26 מערכת החשמל במכונית

ראינו כי כאשר מחברים צרכנים במקביל במעגל מקבילי, כל צרכן פועל בצורה ״עצמאית״, ואינו מושפע מהצרכנים האחרים במעגל. ובכל-זאת אנו יודעים, שבדרך-כלל איננו יכולים להפעיל בבת-אחת את כל המכשירים החשמליים בביתנו, כי על-ידי כך נגרום להפסקת חשמל. הסיבה לכך היא זו: כאשר מחברים צרכן נוסף במקביל, הזרם הכללי במעגל – גָדֵל. נסביר זאת.

כפי שראינו, ההתנגדות השקולה של מעגל מקבילי – קְטֵנָה כאשר מחברים במקביל צרכן נוסף במעגל. לפי חוק אום, הזרם הכללי במעגל – גָדֵל, כאשר ההתנגדות השקולה קְטֵנָה; לכן הוספת צרכן במקביל – מגדילה את הזרם הכללי במעגל. אם הזרם הכללי במערכת החשמל הביתית – גדול מדי, עלולים התַּיִלִים המוליכים להתחמם מאוד, כפי שראינו בפרק 5. כזכור, מוסיפים נתיכים כדי למנוע זאת. נתיכים אלה יכולים לנתק את החשמל בביתנו, אם הזרם גדול מדי.

שאלות חזרה

שאלה 8-24

סמן את כל ההשלמות הנכונות.

כשנגדים מחוברים במקביל במעגל מקבילי ...

א. זורם בהם אותו זרם.

ב. המתח עליהם שווה.

ג. ההתנגדות שלהם שווה.

ד. המתח על כל נגד שווה למתח המקור.

ה. ההתנגדות השקולה שלהם שווה לסכום ההתנגדויות שלהם.

שאלה 8-25

שני נגדים מחוברים במקביל. התנגדות נגד אחד היא $50\ \Omega$, והתנגדות הנגד השני היא $75\ \Omega$. מה ההתנגדות השקולה של שני הנגדים?

שאלה 8-26

ההתנגדות השקולה של שני נגדים, המחוברים במקביל, היא $100\ \Omega$. סמן את הטענה הנכונה.

א. התנגדות אחד משני הנגדים קטנה מ-$100\ \Omega$.

ב. התנגדות כל אחד מהנגדים קטנה מ-$100\ \Omega$.

ג. התנגדות כל אחד מהנגדים גדולה מ-$100\ \Omega$.

ד. סכום ההתנגדויות של הנגדים הוא $100\ \Omega$.

שאלה 8-27

סמן את כל המשוואות הנכונות של התנגדות שקולה של שני נגדים, R_1 ו-R_2, המחוברים במקביל.

א. $R_{eq} = R_1 + R_2$

ב. $\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$

ג. $R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$

ד. $R_{eq} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}$

שאלה 8-28

ברשותך נגדים של $16\ \Omega$, ועליך לקבל התנגדות של $8\ \Omega$. כמה נגדים (מאלה שברשותך) עליך לחבר במקביל, כדי לקבל את ההתנגדות הרצויה?

שאלה 8-29

מעגל מכיל שני נגדים, המחוברים במקביל למקור מתח של $9\ V$. התנגדות נגד אחד היא $180\ \Omega$, והתנגדות הנגד השני היא $90\ \Omega$.

א. מהי ההתנגדות השקולה של שני הנגדים?

ב. חשב את הזרם בכל נגד.

ג. מהו הזרם היוצא מהמקור?

שאלה 8-30

קומקום, שהתנגדותו 20 Ω, מחובר במקביל לתנור חימום, שהתנגדותו 30 Ω, ולנורה, שהתנגדותה 400 Ω. מהי ההתנגדות השקולה של שלושת הצרכנים האלה?

שאלה 8-31

טלוויזיה, מחשב ומכונת כביסה מחוברים במקביל. התנגדות הטלוויזיה – 700 Ω, התנגדות המחשב – 650 Ω, והתנגדות מכונת הכביסה – 20 Ω.

בלי לחשב את ההתנגדות השקולה של שלושת הצרכנים האלה, סמן את הטענה הנכונה.

א. ההתנגדות השקולה גדולה מ-700 Ω.

ב. ההתנגדות השקולה קטנה מ-20 Ω.

ג. ההתנגדות השקולה גדולה מ-1370 Ω.

ד. ההתנגדות השקולה קטנה מ- $\frac{1}{1370}\Omega$.

שאלה 8-32

"הספק המקור שווה לסכום הספקי הצרכנים במעגל".

סמן את כל הטענות הנכונות לגבי המשפט שלמעלה.

א. המשפט נכון לגבי מעגל טורי.

ב. המשפט נכון לגבי מעגל מקבילי.

ג. המשפט אינו נכון לגבי מעגל טורי.

ד. המשפט אינו נכון לגבי מעגל מקבילי.

שאלה 8-33

על נורה רשום 40W/230V. התנגדות מגהץ היא 100 Ω. הנורה והמגהץ בלבד מחוברים במקביל למקור מתח של 230 V.

א. חשב את הזרם בנורה ואת הזרם במגהץ.

ב. חשב את ההספק של הנורה ושל המגהץ.

ג. חשב את הספק המקור.

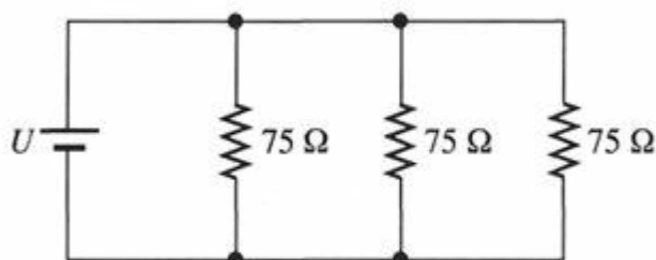
שאלה 8-34

חזור על השאלה הקודמת, אלא שמתח המקור הוא 220 V.

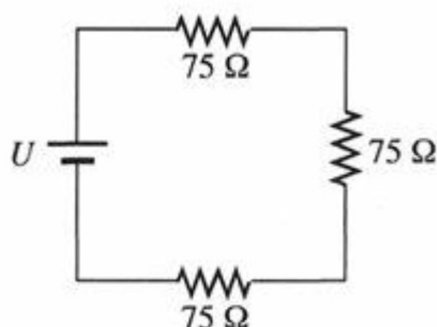
הדרכה: חשב תחילה את התנגדות הנורה, על-פי הרשום עליה.

שאלה 8-35

חשב את ההתנגדות השקולה של כל אחד מהמעגלים שבאיורים 8-27 ו-8-28.



איור 8-27



איור 8-28

שאלה 8-36

א. חמישה נגדים זהים מחוברים בטור. התנגדות כל נגד היא R. מה ההתנגדות השקולה של הנגדים?

ב. מחברים במקביל את חמשת הנגדים. מה ההתנגדות השקולה של הנגדים בחיבור זה?

ג. פי כמה גדולה ההתנגדות השקולה של הנגדים, כשהם מחוברים בטור, מההתנגדות השקולה שלהם, כשהם מחוברים במקביל?

שאלה 8-37

n נגדים זהים מחוברים פעם בטור, ופעם במקביל. פי כמה גדולה ההתנגדות השקולה שלהם בטור, מההתנגדות השקולה שלהם במקביל?

א. n^2 ב. n

ג. $\frac{1}{n}$ ד. $\frac{1}{n^2}$

הדרכה: הצב כמה מספרים במקום n, ובדוק את תשובתך.

שאלה 8-38

השלם:

כשנגדים מחוברים ________, המתח עליהם שווה; וכשנגדים מחוברים ________, זורם בהם אותו זרם. המתח על כל נגד במעגל ________, שווה למתח המקור.

שאלה 8-39

שני נגדים שונים, R_1 ו-R_2, מחוברים במקביל. U_1 הוא המתח על הנגד R_1, ו-U_2 הוא המתח על הנגד R_2. האם נכון להשתמש במשוואה

$$\frac{U_1}{R_1}=\frac{U_2}{R_2}$$

לגבי מעגל זה? נמק, או הבא דוגמה מספרית, שלגביה משוואה זו אינה נכונה.

שאלה 8-40

נתונים שני נגדים שונים, R_1 ו-R. I_1 הוא הזרם בנגד R_1, ו-U_1 הוא המתח על נגד זה. I_2 ו-U_2 הם, בהתאמה, הזרם בנגד R_2, והמתח על נגד זה. סמן ליד כל אחת מהמשוואות הבאות את אחד המספרים 0, 1, 2, לפי המפתח הבא:

1 – המשוואה מתאימה לחיבור טורי.

2 – המשוואה מתאימה לחיבור מקבילי.

0 – המשוואה אינה מתאימה לחיבור טורי, ואף ולא לחיבור מקבילי.

א. $I_1R_1=I_2R_2$

ב. $\frac{I_1}{I_2}=\frac{R_2}{R_1}$

ג. $\frac{U_1}{R_1}=\frac{U_2}{R_2}$

ד. $I_1=I_2$

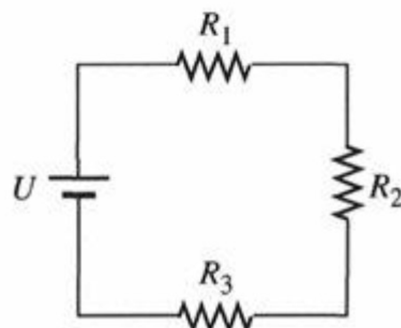
ה. $U_1=U_2$

ו. $\frac{U_1}{U_2}=\frac{R_1}{R_2}$

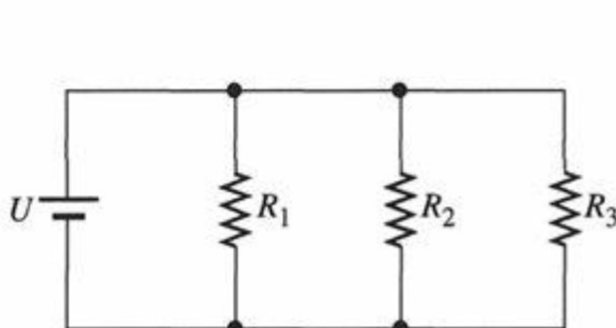
הדרכה: סרטט חיבורים טוריים וחיבורים מקביליים, רשום ערכים מספריים, ובדוק אם תשובותיך נכונות. אם יתברר לך, שמשוואה מסוימת אינה מתאימה לחיבור מסוים, נסה לנמק זאת.

8.4 מעגל מעורב

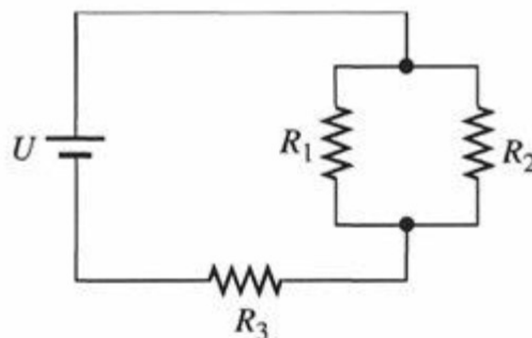
עד כה למדנו על חיבור נגדים בטור ובמקביל. כאשר נתונים שלושה נגדים לפחות, אפשר לחבר את כולם בטור, כפי שרואים באיור 8-29; אפשר לחבר את כולם במקביל, כפי שרואים באיור 8-30; ואפשר לחבר אותם בחיבור מעורב, כפי שרואים באיורים 8-31 ו-8-32. מעגל, שבו הנגדים מחוברים ב**חיבור מעורב**, נקרא **מעגל מעורב**.



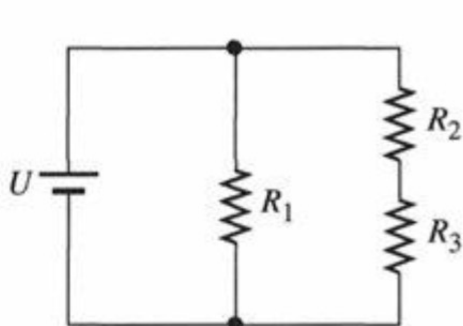
איור 8-29
חיבור בטור של שלושה נגדים



איור 8-30
חיבור במקביל של שלושה נגדים



איור 8-31
חיבור מעורב של שלושה נגדים



איור 8-32
חיבור מעורב אחר של שלושה נגדים

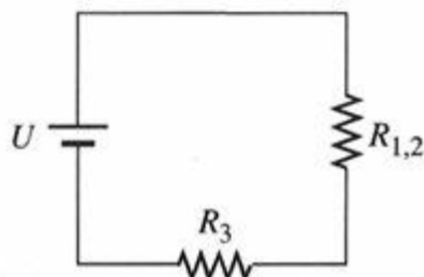
אפשר לראות מיד, שיש הבדל בין שני המעגלים המעורבים שבאיורים 8-31 ו-8-32. במעגל הראשון – הנגדים R_1 ו-R_2 מחוברים זה לזה במקביל, והנגד R_3 מחובר בטור לצירוף המקבילי שלהם. במעגל השני – הנגדים R_2 ו-R_3 מחוברים בטור, והנגד R_1 מחובר במקביל לצירוף הטורי שלהם.

כדי לפתור מעגל מעורב, נשתמש בכללים לחישוב ההתנגדות השקולה של נגדים בטור ובמקביל, שלמדנו בסעיפים הקודמים. לדוגמה: במעגל שבאיור 8-31, נחשב תחילה את

ההתנגדות השקולה של הנגדים R_1 ו-R_2, המחוברים במקביל. נסמן על-ידי $R_{1,2}$ את הנגד השקול לשני נגדים אלה. כפי שלמדנו, התנגדות נגד זה נתונה על-ידי

$$R_{1,2} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

נחליף את הנגדים R_1 ו-R_2 בנגד השקול שלהם, ונקבל את המעגל שבאיור 8-33.



איור 8-33 ההתנגדות $R_{1,2}$ שקולה להתנגדות הנגדים R_1 ו-R_2 שבאיור 8-31

המעגל שקיבלנו הוא מעגל טורי, הכולל שני נגדים: $R_{1,2}$ ו-R_3. ההתנגדות השקולה R_{eq} של שני נגדים אלה – שווה לסכום התנגדויותיהם:

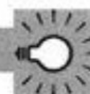
$$R_{eq} = R_{1,2} + R_3$$

נציב את הביטוי שקיבלנו עבור $R_{1,2}$, ונקבל:

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3$$

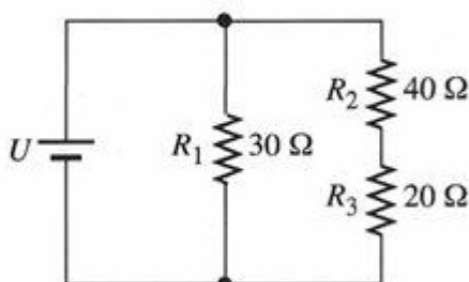
אם-כן, R_{eq} היא ההתנגדות השקולה של שלושת הנגדים במעגל שבאיור 8-31.

באופן כללי, כדי לפתור מעגל מעורב, מחפשים קבוצות של נגדים המחוברים בטור, ומחליפים אותן בנגד השקול שלהן. מחפשים גם קבוצות של נגדים המחוברים במקביל, ומחליפים גם אותן בנגד השקול שלהן. כך ממשיכים, עד שכל הנגדים במעגל יוחלפו בנגד שקול יחיד.



דוגמה 8-13

חשב את ההתנגדות השקולה של המעגל שבאיור 8-34.



איור 8-34

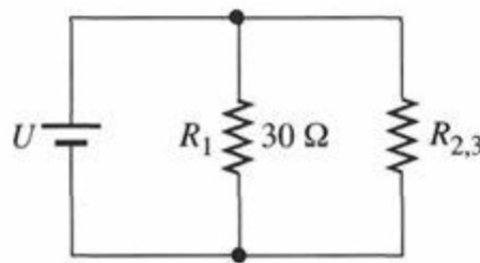
פתרון

הנגדים R_2 ו-R_3 – במעגל שבאיור 8-34 – מחוברים בטור. ההתנגדות השקולה שלהם $R_{2,3}$ היא

$$R_{2,3} = R_2 + R_3 = 40 + 20 = 60\ \Omega$$

באיור 8-35 מתואר המעגל, המתקבל לאחר שמחליפים את שני הנגדים R_2 ו-R_3 – בנגד השקול $R_{2,3}$. נגד זה מחובר במקביל לנגד R_1. ההתנגדות השקולה R_{eq} של שני הנגדים R_1 ו-$R_{2,3}$ היא

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_{2,3}}{R_1 + R_{2,3}} = \frac{30 \times 60}{30 + 60} = \frac{1,800}{90} = 20\ \Omega$$

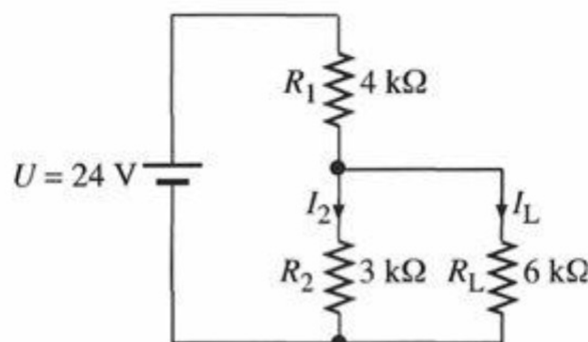


איור 8-35 הנגדים R_2 ו-R_3 שבאיור 8-34 – הוחלפו בנגד השקול $R_{2,3}$



חישוב זרמים ומתחים במעגל מעורב

למדנו לחשב את ההתנגדות השקולה של מעגלים מעורבים. עתה נלמד לחשב גם את הזרמים והמתחים במעגלים כאלה. נשתמש במעגל שבאיור 8-36, כדי להדגים את השלבים בחישוב הזרמים והמתחים השונים במעגל מעורב.



איור 8-36 מעגל מעורב

תחילה נחשב את ההתנגדות השקולה של המעגל:

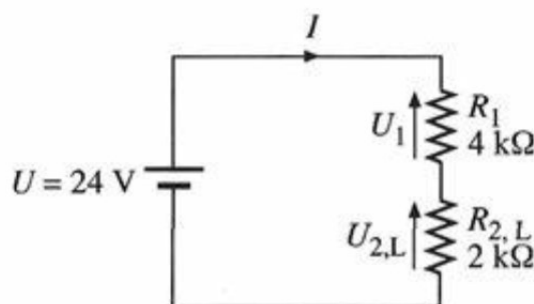
הנגד R_L מחובר במקביל לנגד R_2 (מקובל לסמן את הצרכן במעגל על-ידי R_L). נסמן על-ידי $R_{2,L}$ את ההתנגדות השקולה של שני נגדים אלה, ונחשב אותה:

$$R_{2,L} = \frac{R_2 R_L}{R_2 + R_L} = \frac{3,000 \times 6,000}{3,000 + 6,000} = 2,000\ \Omega = 2\ \text{k}\Omega$$

במעגל שבאיור 8-37 החלפנו את שני הנגדים R_2 ו-R_L בנגד השקול שלהם $R_{2,L}$.

עתה נחשב את ההתנגדות השקולה R_{eq} של הנגדים R_1 ו-$R_{2,L}$, המחוברים בטור:

$$R_{eq} = R_1 + R_{2,L} = 4,000 + 2,000 = 6,000\ \Omega = 6\ \text{k}\Omega$$



איור 8-37 הנגדים R_2 ו-R_L הוחלפו בנגד השקול $R_{2,L}$

חישוב הזרם הכללי I במעגל

כפי שלמדנו, המתח על ההתנגדות השקולה שווה למתח המקור U. לפי חוק אום, הזרם הכללי במעגל נתון על-ידי

$$I = \frac{U}{R_{eq}} = \frac{24}{6,000} = 0.004\ \text{A} = 4\ \text{mA}$$

מטעמי נוחות, נחשב תחילה את המתחים על הנגדים, ורק אחר-כך נחשב את הזרמים בנגדים.

חישוב המתחים על הנגדים

לפי איור 8-37 אפשר לראות, שהזרם I הוא הזרם העובר בנגד R_1. כלומר: הזרם בנגד R_1 הוא 4 mA.

לפי חוק אום, המתח U_1 על נגד זה נתון על-ידי

$$U_1 = R_1 I = 4{,}000 \times 0.004 = 16 \text{ V}$$

לפי חוק המתחים של קירכהוף, המתח $U_{2,L}$ במעגל שבאיור 8-37 – נתון על-ידי

$$U_{2,L} = U - U_1 = 24 - 16 = 8 \text{ V}$$

המתח $U_{2,L}$ הוא המתח על הנגד $R_{2,L}$, השקול לשני הנגדים R_2 ו-R_L (איור 8-36), המחוברים במקביל. כלומר, המתח $U_{2,L}$ שווה גם למתח U_2 על הנגד R_2 ולמתח U_L על הנגד R_L:

$$U_{2,L} = U_2 = U_L = 8 \text{ V}$$

חישוב הזרמים בנגדים

מצאנו כבר כי הזרם בנגד R_1 הוא 4 mA. לפי חוק אום, הזרם I_2 בנגד R_2 הוא

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{8}{3{,}000} = 0.00267 \text{ A} = 2.67 \text{ A}$$

והזרם I_L בנגד R_L הוא

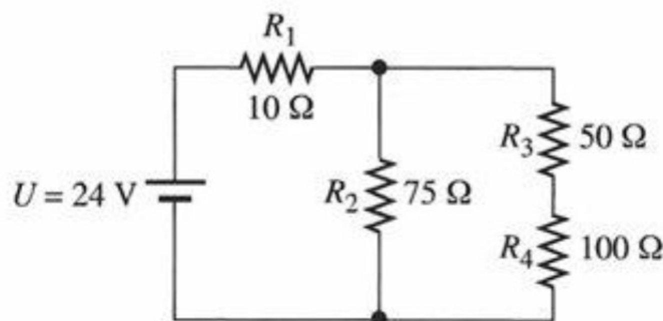
$$I_L = \frac{U_L}{R_L} = \frac{8}{6{,}000} = 0.00133 \text{ A} = 1.33 \text{ A}$$

אנו רואים כי סכום שני זרמים אלה שווה לזרם הכללי במעגל.



דוגמה 8-14

חשב את הזרם בנגד R_1 ואת המתח עליו במעגל שבאיור 8-38.



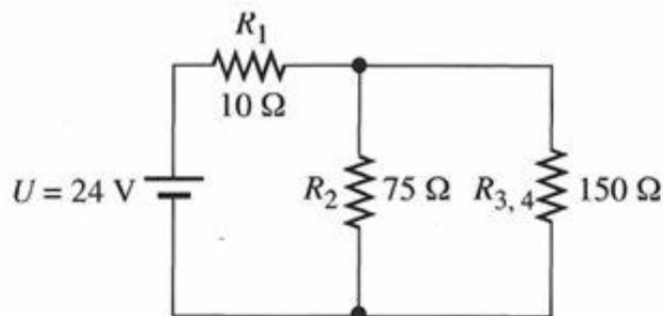
איור 8-38

פתרון

נחשב תחילה את ההתנגדות השקולה של המעגל. הנגדים R_3 ו-R_4 מחוברים בטור, וההתנגדות השקולה שלהם $R_{3,4}$ היא

$$R_{3,4} = R_3 + R_4 = 50 + 100 = 150\ \Omega$$

הנגד השקול $R_{3,4}$ מחובר במקביל לנגד $R_2 = 75\ \Omega$, כפי שרואים באיור 8-39.



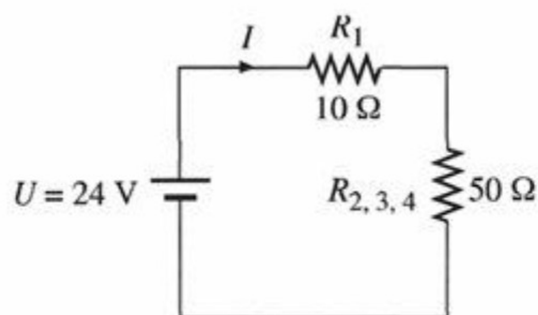
איור 8-39

ההתנגדות השקולה $R_{2,3,4}$ של שני הנגדים R_2 ו-$R_{3,4}$, המחוברים במקביל, היא

$$R_{2,3,4} = \frac{R_2 R_{3,4}}{R_2 + R_{3,4}} = \frac{75 \times 150}{75 + 150} = \frac{11,250}{225} = 50\ \Omega$$

הנגדים R_1 ו-$R_{2,3,4}$ מחוברים בטור, כפי שניתן לראות במעגל שבאיור 8-40. ההתנגדות השקולה שלהם R_{eq} היא

$$R_{eq} = R_1 + R_{2,3,4} = 10 + 50 = 60\ \Omega$$



איור 8-40

הזרם בנגד R_1 הוא הזרם הכללי I במעגל, כלומר:

$$I = \frac{U}{R_{eq}} = \frac{24}{60} = 0.4 \text{ A}$$

ולפי חוק אום, המתח U_1 על הנגד R_1 הוא

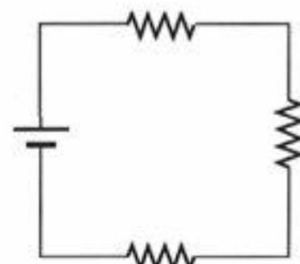
$$U_1 = IR_1 = 0.4 \times 10 = 4 \text{ V}$$

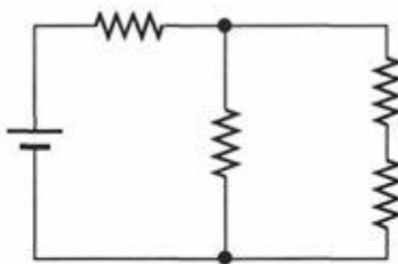


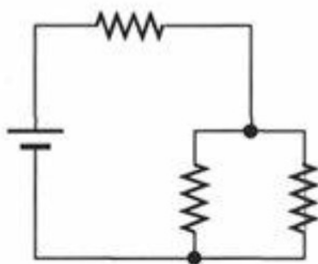
שאלות חזרה

שאלה 8-41

ההתנגדות של כל אחד מהנגדים במעגלים שבאיור 8-41 היא 12 Ω. חשב את ההתנגדות השקולה של כל אחד ממעגלים אלה.







א ב ג

איור 8-41

שאלה 8-42

מהי ההתנגדות השקולה של המעגל שבאיור 8-42?

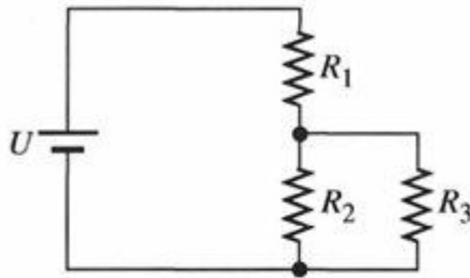
א. $R_1 + R_2 + R_3$

ב. $\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3$

ג. $R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$

ד. $\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$

ה. $R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_2 + R_3}$



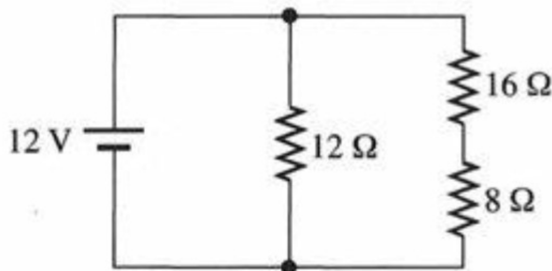
איור 8-42

שאלה 8-43

חזור וחשב את הזרמים והמתחים במעגל שבאיור 8-36, אך חשב תחילה את הזרמים - ואחר-כך את המתחים.

שאלה 8-44

חשב את הזרם בנגד, שהתנגדותו 16 Ω, במעגל שבאיור 8-43.

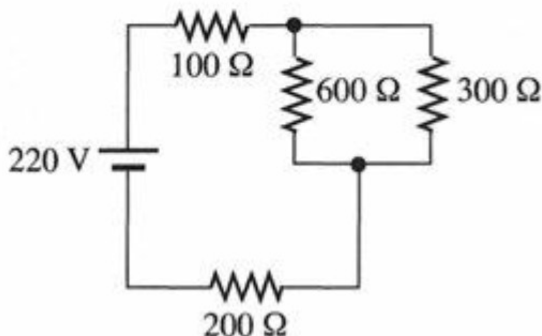


איור 8-43

שאלה 8-45

א. חשב את המתח על הנגד, שהתנגדותו 600 Ω, במעגל שבאיור 8-44.

ב. חשב את ההספק של נגד זה.

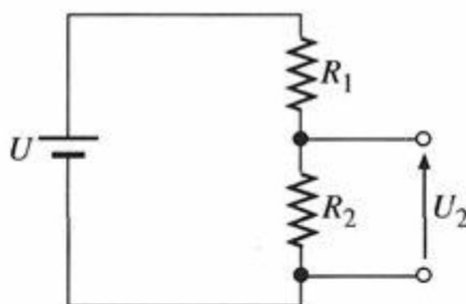


איור 8-44

8.5 נגדים משתנים

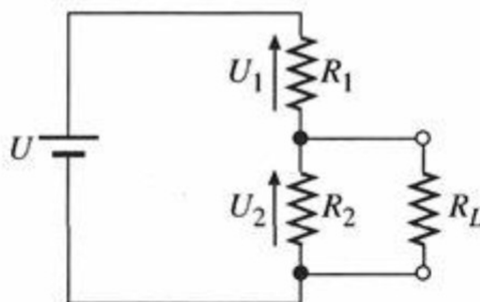
מחלק מתח

במעגלים חשמליים ואלקטרוניים רבים, צריך לפעמים לשנות את המתח על הצרכן. בעזרת שני נגדים, המחוברים בטור במעגל חשמלי, אפשר לקבל מתח (בין שתי נקודות במעגל זה), הקטן ממתח המקור. נתבונן במעגל שבאיור 8-45. במעגל זה – מתח המקור U מתחלק בין שני הנגדים R_1 ו-R_2, ולכן המתח U_2 על הנגד R_2 – קטן ממתח המקור. מעגל כזה נקרא לפעמים **מחלק מתח**.



איור 8-45 מחלק מתח

אם נחבר צרכן R_L במקביל לנגד R_2, נקבל על הצרכן מתח הקטן ממתח המקור. חיבור כזה מתואר באיור 8-46.



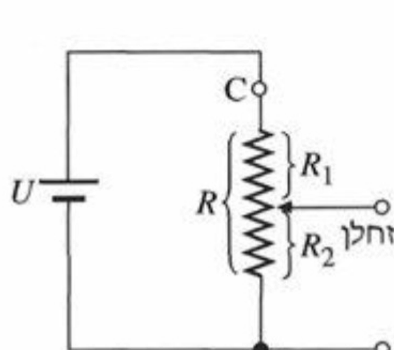
איור 8-46 הצרכן R_L מחובר במקביל לנגד R_2, השייך למחלק מתח

נגד משתנה בחיבור פוטנציומטרי

בכל פעם שרוצים לשנות את המתח על הצרכן R_L במעגל שבאיור 8-46, צריך להחליף לפחות אחד מהנגדים R_1 או R_2. ברור שסידור כזה אינו נוח, ולכן במעגלים שבהם צריך לשנות את המתח על הצרכן, משתמשים בנגד משתנה.

נגד כזה עשוי משכבה של תערובת פחם או מתיל מתכת, המלופף כסליל. על הנגד נמצא זחלן שאפשר להזיזו, ובאמצעותו אפשר לשנות את המתח על הצרכן.

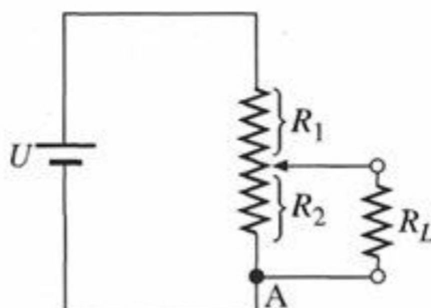
באיור 8-47 מתואר מעגל, שבו מחובר הנגד המשתנה. התנגדות הנגד המשתנה היא R, והזחלן מחלק את הנגד המשתנה לשני נגדים, R_1 ו-R_2, שסכום ההתנגדויות שלהם הוא R. הזזת הזחלן משנה את היחס בין ההתנגדות R_1 להתנגדות R_2, אך סכום ההתנגדויות נשאר תמיד קבוע – R.



איור 8-47 פוטנציומטר מחובר במעגל חשמלי

כדי להשתמש בנגד המשתנה כמחלק מתח משתנה, מחברים אליו צרכן R_L, כפי שניתן לראות במעגל שבאיור 8-48. הדק אחד של הצרכן מחובר לקצה הקבוע של הנגד המשתנה (באיור 8-48 – הקצה הקבוע הוא A), וההדק השני מחובר לזחלן.

חיבור כזה הוא **חיבור פוטנציומטרי**, והנגד המשתנה נקרא אז **פוטנציומטר**. הזזת הזחלן משנה את היחס בין R_1 ל-R_2, וכתוצאה מכך משתנה המתח על הצרכן R_L. צרכן זה מחובר, באיור 8-48, במקביל לנגד R_2, והשקול של שני נגדים אלה – מחובר בטור לנגד R_1.



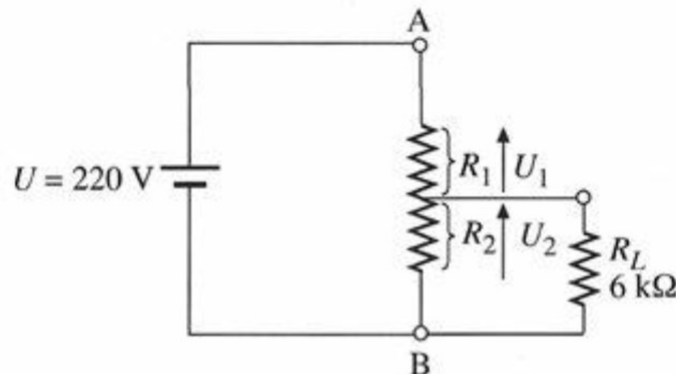
איור 8-48 צרכן מחובר לפוטנציומטר במעגל חשמלי



דוגמה 8-15

צרכן מחובר לנגד משתנה בחיבור פוטנציומטרי, כמתואר במעגל שבאיור 8-49. נתון כי

$$R_1 + R_2 = 12\ \text{k}\Omega$$



איור 8-49

מהו המתח על הצרכן R_L, כשהזחלן של הפוטנציומטר נמצא במצב כזה, שהיחס בין R_1 ל-R_2 הוא 3?

פתרון

תחילה נמצא את ההתנגדויות R_1 ו-R_2. אנו יודעים כי

$$\frac{R_1}{R_2} = 3$$

כלומר:

$$R_1 = 3R_2$$

נציב זאת במשוואה

$$R_1 + R_2 = 12\ \text{k}\Omega$$

ונקבל:

$$3R_2 + R_2 = 12\ \text{k}\Omega$$

ומכאן:

$$4R_2 = 12\ \text{k}\Omega$$

$$R_2 = 3\ \text{k}\Omega$$

וכן נקבל:

$$R_1 = 3R_2 = 9\ \text{k}\Omega$$

R_L מחובר במקביל ל-R_2 (איור 8-49), וההתנגדות השקולה $R_{2,L}$ של שני נגדים אלה היא

$$R_{2,L}=\frac{R_2R_L}{R_2+R_L}=\frac{3,000\times6,000}{3,000+6,000}=\frac{18,000,000}{9,000}=2,000\ \Omega=2\ \text{k}\Omega$$

ההתנגדות השקולה $R_{2,L}$ מחוברת בטור להתנגדות R_1. ההתנגדות השקולה R_{eq} של שתי ההתנגדויות אלה היא

$$R_{\text{eq}}=R_1+R_{2,L}=9,000+2,000=11,000\ \Omega=11\ \text{k}\Omega$$

זוהי גם ההתנגדות השקולה של המעגל. לפי חוק אום, הזרם הכללי במעגל הוא

$$I=\frac{U}{R_{eq}}=\frac{220}{11,000}=0.02\ \text{A}=20\ \text{mA}$$

הזרם I זורם בנגד R_1. המתח U_1 על הנגד R_1 הוא

$$U_1=IR_1=0.02\times9,000=180\ \text{V}$$

לפי חוק המתחים של קירכהוף, המתח $U_{2,L}$ על ההתנגדות השקולה $R_{2,L}$ הוא

$$U_{2,L}=U-U_1=220-180=40\ \text{V}$$

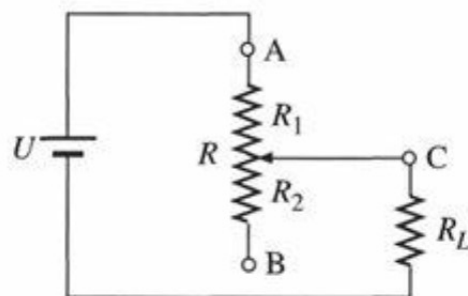
וזהו גם המתח על כל אחד מהנגדים R_2 ו-R_L, המחוברים במקביל. כלומר, המתח על הצרכן R_L הוא 40 V.



נגד משתנה בחיבור ריאוסטטי

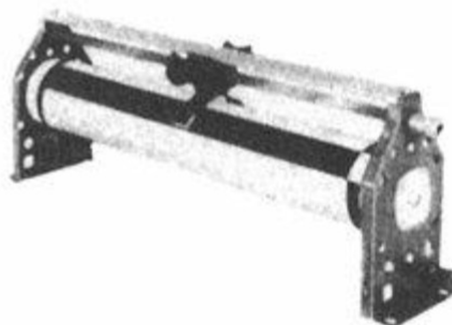
לפעמים מחברים את הנגד המשתנה, כפי שמתואר באיור 8-50. כלומר, אין מחברים כלל את אחד הקצוות הקבועים של הנגד המשתנה, ומנצלים רק את ההתנגדות שבין הזחלן לבין הקצה הקבוע השני של הנגד המשתנה. במצב זה – הנגד המשתנה נקרא **ריאוסטט** וחיבור כזה נקרא בהתאם - **חיבור ריאוסטטי**.

ככל שהזחלן בריאוסטט קרוב יותר לקצה הקבוע A (איור 8-50), התנגדות הריאוסטט (כלומר, ההתנגדות בין הנקודות A ו-C) קטנה יותר. כאשר הזחלן נוגע בקצה החופשי B, כל ההתנגדות R של הריאוסטט מחוברת למעגל. ההתנגדות R_1 שבאיור 8-50 – מחוברת בטור להתנגדות R_L. ההתנגדות R_2 אינה מחוברת במעגל זה.



איור 8-50 מעגל הכולל ריאוסטט

מהו ההבדל בין פוטנציומטר לריאוסטט? בפוטנציומטר משתמשים בשלושה הדקים, ואילו בריאוסטט משתמשים רק בשני הדקים. בפוטנציומטר זורם זרם דרך הנגד R כולו, ואילו בריאוסטט זורם זרם רק בחלק R_1 של הנגד, בין הקצה הקבוע המחובר – ובין הזחלן. באיור8-51 מופיעים תצלומים של נגדים משתנים אלה.



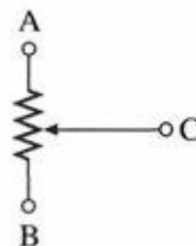
ריאוסטט



פוטנציומטר

איור 8-51 תצלומים של נגדים משתנים

באיור 8-52 מופיעים הסמלים של רכיבים אלה.

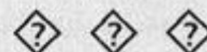
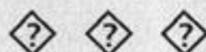


א - פוטנציומטר



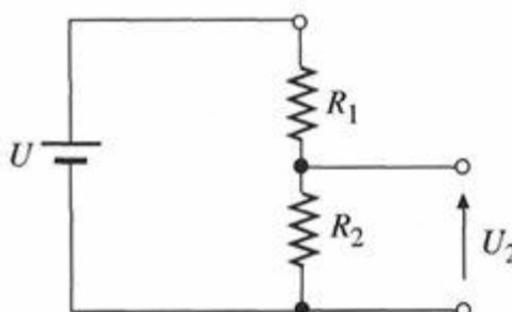
ב - ריאוסטט

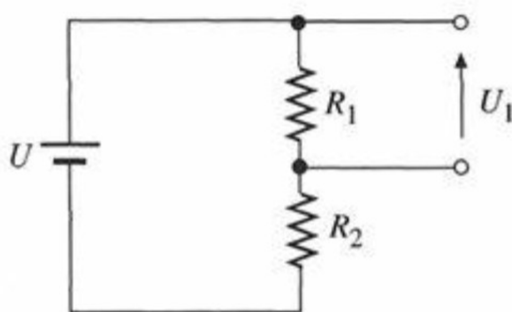
איור 8.52 סמלים של נגדים משתנים

 שאלות חזרה 

שאלה 8-46

סמן את כל הטענות הנכונות לגבי שני המעגלים שבאיור 8-53.





איור 8-53

א. רק המעגל **הימני** אינו מחלק מתח.

ב. רק המעגל **השמאלי** אינו מחלק מתח.

ג. שני המעגלים הם מחלקי מתח.

ד. שני המעגלים **אינם** מחלקי מתח.

שאלה 8-47

המתח U_2 במעגל שבאיור 8-54 נתון על-ידי

א. $\frac{R_2}{R_1+R_2}U$

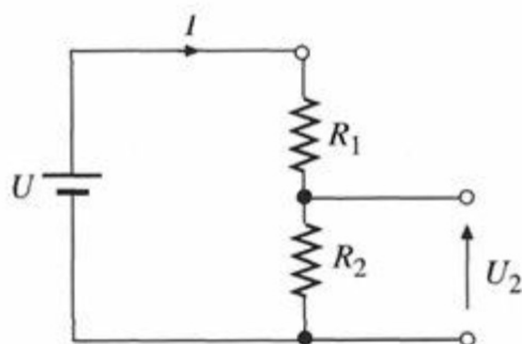
ב. $\frac{R_2}{R_1}U$

ג. $\frac{R_1+R_2}{R_2}U$

ד. $\frac{R_1}{R_2}U$

ה. $\frac{R_1}{R_1+R_2}U$

ו. $\frac{R_1+R_2}{R_1}U$



איור 8-54

הדרכה: השתמש בחוק אום לגבי הנגד R_2 ולגבי ההתנגדות השקולה.

שאלה 8-48

הראה כי כאשר $R_1 = 2R_2$ במעגל שבאיור 8-54, מקבלים כי

$$U_2 = \frac{U}{3}$$

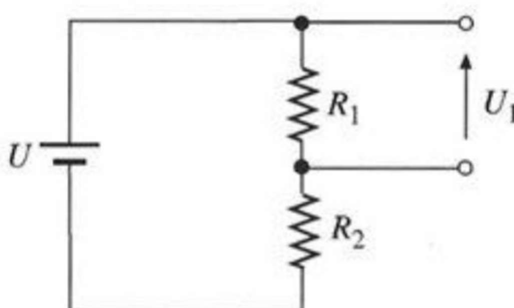
שאלה 8-49

המתח U_1 במעגל שבאיור 8-55, נתון על-ידי

א. $\dfrac{R_1 + R_2}{R_1}U$ ב. $\dfrac{R_1}{R_1}U$

ג. $\dfrac{R_1}{R_1 + R_2}U$ ד. $\dfrac{R_2}{R_1}U$

ה. $\dfrac{R_1 + R_2}{R_2}U$ ו. $\dfrac{R_2}{R_1 + R_2}U$



איור 8-55

שאלה 8-50

"המתח על כל אחד מהנגדים במחלק מתח, קטן ממתח המקור". נכון או לא? נמק.

שאלה 8-51

נתון מחלק מתח, שבו שני הנגדים זהים. המתח על כל אחד מהנגדים ...

א. שווה למתח המקור.

ב. שווה למחצית מתח המקור.

ג. גדול ממתח המקור.

ד. קטן ממחצית מתח המקור.

שאלה 8-52

חזור על דוגמה 8-15 עבור המצב שבו ההתנגדות R_1 שווה להתנגדות R_2.

שאלה 8-53

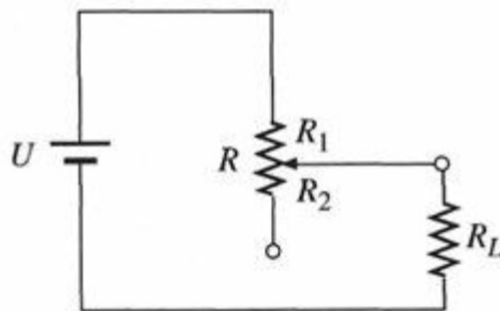
הוסף "ריאוסטט" או "פוטנציומטר" בכל מקום מסומן:

ב_______ משתמשים בשלושה הדקים. ואילו ב_______ משתמשים בשני הדקים.

ב_______ זורם זרם דרך הנגד כולו, ואילו ב_______ זורם זרם רק דרך חלק של הנגד, בין הקצה הקבוע המחובר, ובין הזחלן.

שאלה 8-54

מה ההתנגדות השקולה של המעגל שבאיור 8-56?



איור 8-56

א. R_1 ב. R_2 ג. R_L ד. $R_1 + R_2$

ה. $R_1 + R_L$ ו. $R_2 + R_L$ ז. $R_1 + \frac{R_2 R_L}{R_2 + R_L}$ ח. $\frac{R_1 R_L}{R_1 + R_L}$

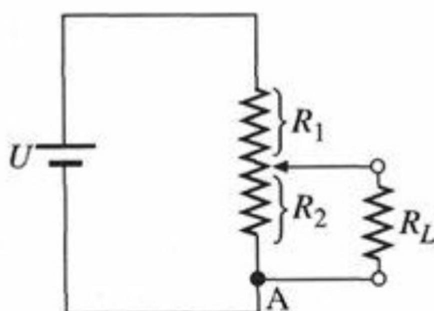
שאלה 8-55

"הזזת הזחלן במעגל שבאיור 8-57, משנה את היחס בין R_1 ל-R_2, וכתוצאה מכך משתנה המתח על הצרכן R_L."

א. הראה כי כאשר $R_1 = 0$, המתח על הצרכן R_L הוא U.

ב. הראה בעזרת דוגמה מספרית כי כאשר $R_1 = R_2$, המתח על הצרכן קטן מ-$\frac{U}{2}$.

ג. הראה כי כאשר $R_1 = R_2 = R_L$, המתח על הצרכן הוא $\frac{U}{3}$.

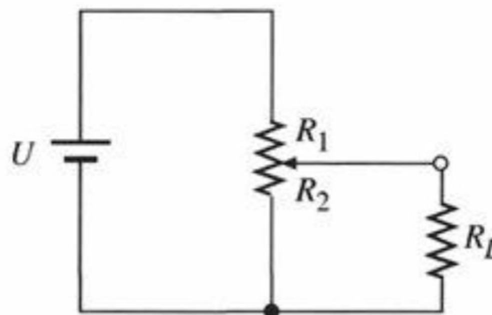


איור 8-57

שאלה 8-56

הראה כי ההתנגדות השקולה R_{eq} של המעגל שבאיור 8-58 היא

$$R_{eq} = R_1 + \frac{R_2 R_L}{R_2 + R_L}$$

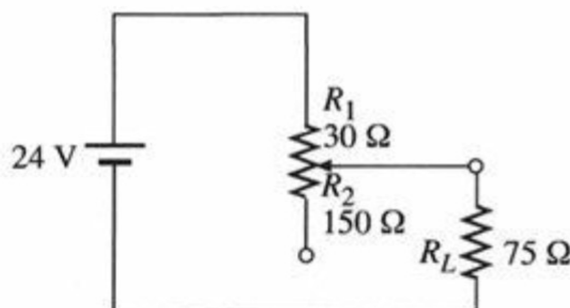


איור 8-58

שאלה 8-57

א. חשב את ההתנגדות השקולה של הנגדים R_1 ו-R_L במעגל שבאיור 8-59. מה התנגדות המעגל?

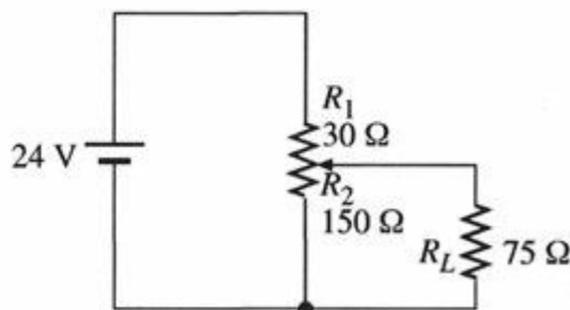
ב. חשב את המתח על הצרכן R_L.



איור 8-59

שאלה 8-58

חשב את המתח על הצרכן R_L באיור 8-60.

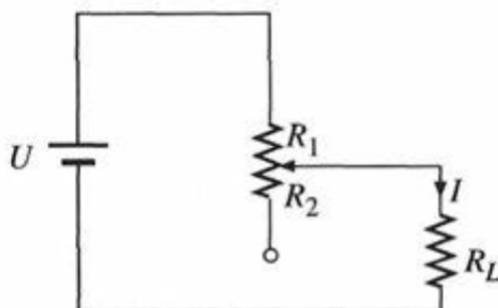


איור 8-60

שאלה 8-59

הראה כי הזרם בצרכן R_L במעגל שבאיור 8-61, נתון על-ידי

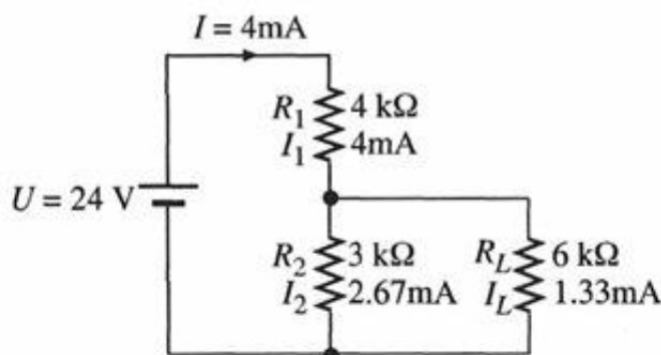
$$I = \frac{U}{R_1 + R_L}$$



איור 8-61

8.6 הספק, נצילות וחשבון החשמל

בסעיפים הקודמים למדנו, כי גם במעגל טורי וגם במעגל מקבילי, סכום ההספקים של הצרכנים – שווה להספק המקור. עתה נראה שגם במעגל מעורב, סכום ההספקים של הצרכנים – שווה להספק המקור. נדגים זאת לגבי המעגל שבאיור 8-62. מעגל זה זהה למעגל שבאיור 8-36, וכבר חישבנו את הזרמים בו.



איור 8-62

עכשיו נחשב את ההספקים במעגל. לשם כך נרשום את הזרמים ביחידות אמפר, ואת ההתנגדויות - ביחידות אום.

הספק המקור נתון על-ידי

$$P = UI = 24 \times 0.004 = 0.096\ \mathrm{W} = 96\ \mathrm{mW}$$

והספקי הצרכנים הם

$$P_1 = I_1{}^2 R_1 = 0.004^2 \times 4{,}000 = 0.064\ \mathrm{W} = 64\ \mathrm{mW}$$

$$P_2 = I_2{}^2 R_2 = 0.00267^2 \times 3{,}000 = 0.02139\ \mathrm{W} = 21.39\ \mathrm{mW}$$

$$P_\mathrm{L} = I_\mathrm{L}{}^2 R_\mathrm{L} = 0.00133^2 \times 6{,}000 = 0.001061\ \mathrm{W} = 10.61\ \mathrm{mW}$$

וסכום הספקי הצרכנים הוא

$$P_1 + P_2 + P_L = 64 + 21.39 + 10.61 = 96\ \mathrm{mW}$$

אנו רואים כי במעגל שבאיור 8-62, הספק המקור שווה לסכום הספקי הצרכנים:

$$P = P_1 + P_2 + P_L = 96\ \mathrm{mW}$$

תוצאה זו תתקבל לגבי כל מעגל מעורב. נסיק אפוא כי

סכום הספקי הצרכנים במעגל מעורב – שווה להספק המקור.

אנרגיה מושקעת, אנרגיה מופקת-מועילה ונצילות

ראינו כי כאשר זרם עובר בנגד, הנגד מתחמם. כלומר, אנרגיה חשמלית הופכת לחום. יש מקרים, שבהם אנו מעוניינים בחום הנוצר בצרכן; למשל, כשהצרכן הוא תנור חימום, או קומקום חשמלי. אבל יש גם מקרים, שבהם החום הנוצר בצרכן אינו נחוץ לנו. למשל, כאשר הצרכן הוא מנוע חשמלי, אנו מעוניינים באנרגיה המכָנית ואיננו זקוקים לחום הנוצר.

אם-כן, במעגל חשמלי שמחובר בו צרכן, מושקעת אנרגיה חשמלית (על-ידי מקור המתח) ומופקת אנרגיה בצורות שונות. אנו יכולים להבחין בין אנרגיה מופקת המועילה לנו, לבין אנרגיה מופקת, שהיא מבחינתנו אנרגיה מבוזבזת.*

---

* נדגיש כי אנרגיה מבוזבזת איננה אנרגיה שנעלמת. לפי חוק שימור האנרגיה, אנרגיה אינה יכולה להיעלם. כשאנו אומרים אנרגיה מבוזבזת, אנו מתכוונים לאנרגיה שאינה מועילה לנו.

האנרגיה המבוזבזת מופיעה, בדרך-כלל, בצורת חום. במנוע חשמלי, שהזכרנו כבר, חלק מהאנרגיה מתבזבז בתַיִלים המוליכים, וחלק מתבזבז תוך התגברות על החיכוך בין חלקי המנוע המסתובבים.

בזבוז אנרגיה הוא חיסרון של הֶתְקֵנִים, ההופכים אנרגיה מצורה אחת לצורה אחרת, ואנו רוצים לצמצם את הבזבוז ככל האפשר. ככל שנקטין את האנרגיה המבוזבזת, נקבל יותר אנרגיה מופקת-מועילה, כי

האנרגיה המבוזבזת היא ההפרש בין האנרגיה המושקעת לאנרגיה המופקת-המועילה לנו.

היחס בין האנרגיה המופקת-המועילה, לבין האנרגיה המושקעת – נקרא **נצילות**. ובכן, הנצילות של מעגל חשמלי נתונה על-ידי

$$\text{נצילות} = \frac{\text{אנרגיה מופקת-מועילה}}{\text{אנרגיה מושקעת}}$$

למעשה, הגדרה זו של נצילות אינה מוגבלת למעגלים בלבד, אך אנו נעסוק רק בנצילות של מעגלים.

נסמן את הנצילות על-ידי האות היוונית η (אֶטָא); את האנרגיה המושקעת בצרכן נסמן על-ידי W_{in}; ואת האנרגיה המופקת-המועילה, המתקבלת מהצרכן, נסמן על-ידי W_{out}. נקבל כי

$$\eta = \frac{W_{out}}{W_{in}} \qquad (8\text{-}11)$$

η – נצילות

W_{out} – אנרגיה מופקת-מועילה [J]

W_{in} – אנרגיה מושקעת [J]

כדי לדעת את הנצילות של מעגל חשמלי, יש לחשב את האנרגיה המושקעת במעגל במשך זמן מסוים, ואת האנרגיה המופקת-המועילה של המעגל **במשך אותו זמן**.

מקובל לרשום את הנצילות באחוזים. אם, למשל, הנצילות היא $\eta = 0.7$, מקובל לרשום ערך זה בצורה $\eta = 70\%$.



דוגמה 8-16

תנור חימום חשמלי הפיק, במשך ערב אחד, כמות של אנרגיית חום בשיעור 18 מיליון ג'ול. נצילות התנור היא 90%. מה כמות האנרגיה החשמלית, שהושקעה בתנור במשך אותו ערב?

פתרון

האנרגיה המופקת-המועילה של התנור היא $W_{out} = 18{,}000{,}000$ J. הנצילות היא 90%, כלומר: $\eta = 0.9$. כדי לחשב את האנרגיה המושקעת, נשתמש במשוואת הנצילות (8-11):

$$\eta = \frac{W_{out}}{W_{in}}$$

נציב את הנתונים, ונקבל:

$$0.9 = \frac{18{,}000{,}000}{W_{in}}$$

ומכאן נקבל כי

$$W_{in} = \frac{18{,}000{,}000}{0.9} = 20{,}000{,}000 \text{ J}$$

האנרגיה החשמלית, שהושקעה בתנור, היא 20,000,000 J.



נצילות אידיאלית

ככל שהערך של האנרגיה המועילה קרוב יותר לערך של האנרגיה המושקעת, האנרגיה המבוזבזת קטנה יותר, והנצילות גדולה יותר. במצב אידיאלי, כל האנרגיה המושקעת הופכת לאנרגיה מופקת-מועילה, כלומר, האנרגיה המופקת-המועילה שווה לאנרגיה המושקעת:

$$W_{out} = W_{in}$$

לכן במצב האידיאלי נקבל כי

$$\eta = \frac{W_{out}}{W_{in}} = 1$$

כלומר, הנצילות היא 100%. נצילות כזאת היא אידיאלית. באופן מעשי, אי-אפשר לקבל נצילות של 100%, אבל אפשר להתקרב לנצילות כזאת. למשל, הנצילות של מנועים חשמליים יכולה להגיע ל-90%, ואפילו יותר.

הנצילות כיחס הספקים

ראינו כי הנצילות של מעגל חשמלי היא היחס בין האנרגיה המופקת-המועילה של מעגל במשך זמן מסוים, לבין האנרגיה המושקעת במעגל במשך אותו זמן. עכשיו ברצוננו להראות, כי הנצילות היא גם היחס בין ההספק המופק-המועיל P_{out} לבין ההספק המושקע P_{in}. ואמנם, לפי הגדרת ההספק, האנרגיה המושקעת בצרכן במשך פרק זמן t, נתונה על-ידי

$$W_{in} = P_{in} \cdot t$$

והאנרגיה המופקת-המועילה W_{out}, המתקבלת מהצרכן במשך אותו פרק זמן t, נתונה על-ידי

$$W_{out} = P_{out} \cdot t$$

ומכאן נקבל כי

$$\eta = \frac{W_{out}}{W_{in}} = \frac{P_{out} \cdot t}{P_{in} \cdot t} = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

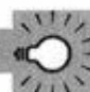
כלומר:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \qquad (8\text{-}12)$$

קיבלנו אפוא שתי הגדרות לנצילות:

- היחס בין האנרגיה המופקת-המועילה לאנרגיה המושקעת בפרק זמן מסוים;
- היחס בין ההספק המופק-המועיל להספק המושקע.

נוכל להשתמש בכל אחת מהגדרות אלה, בהתאם לנוחותנו ולנתוני הבעיה העומדת בפנינו.



דוגמה 8-17

ההספק המופק-המועיל של מנוע במכונת כביסה מסוימת הוא 2 kW. נצילות המנוע היא 80%. חשב את ההספק, שהמנוע צורך מרשת החשמל.

פתרון

נתון כי ההספק המופק-המועיל הוא $P_{out} = 2\ kW = 2{,}000\ W$, והנצילות היא 80%, כלומר: $\eta = 0.8$. עלינו לחשב את ההספק המושקע, כלומר: ההספק שהמנוע צורך. נשתמש במשוואת הנצילות (8-12):

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

נציב את הגדלים הנתונים, ונקבל:

$$0.8 = \frac{2{,}000}{P_{in}}$$

ומכאן:

$$P_{in} = \frac{2{,}000}{0.8} = 2{,}500\ W = 2.5\ kW$$

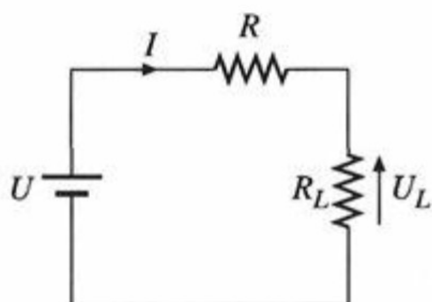
ההספק, שהמנוע צורך, הוא 2.5 kW.



חישובי נצילות במעגל טורי

עד כה חישבנו נצילות לפי היחס בין ההספק המופק-המועיל להספק המושקע במעגל (או לפי היחס בין האנרגיה המופקת-המועילה לאנרגיה המושקעת). עכשיו נלמד לחשב נצילות של מעגל טורי – רק על-פי ערכי ההתנגדויות במעגל זה.

באיור 8-63 נתון מעגל טורי, הכולל שתי התנגדויות: התנגדות הצרכן R_L וההתנגדות R. ההתנגדות R מייצגת את ההתנגדות השקולה של כל ההתנגדויות במעגל, מלבד התנגדות הצרכן (למשל: ההתנגדות R מייצגת את התנגדות הקו).



איור 8-63

נבטא את ההספקים במעגל זה. תחילה נבטא את **הספק המקור** (הנקרא גם **הספק המעגל**). נזכור כי ההספק P של המקור – נתון על-ידי מכפלת מתח המקור U בזרם המעגל I:

$$P = UI$$

הספק המקור הוא ההספק המושקע במעגל. ההספק המופק-המועיל הוא, מבחינתנו, ההספק P_L של הצרכן R_L; וההתנגדות השנייה R גורמת לבזבוז הספק (ואנרגיה) במעגל. מכיוון שהמעגל הוא טורי, הזרם I זורם גם בצרכן, וההספק P_L של הצרכן – נתון על-ידי מכפלת המתח עליו (U_L) בזרם דרכו, כלומר:

$$P_L = U_L I$$

הנצילות η היא היחס בין ההספק המופק-המועיל להספק המושקע, לכן

$$\eta = \frac{P_L}{P} = \frac{U_L I}{UI}$$

ומכאן:

$$\eta = \frac{U_L}{U} \qquad (8\text{-}13)$$

כלומר, נצילות המעגל הטורי שווה ליחס שבין המתח על הצרכן לבין מתח המקור. עכשיו נבטא את המתח על הצרכן באמצעות מתח המקור וההתנגדויות במעגל, כדי לבטא את הנצילות על-פי ההתנגדויות בלבד.

הנצילות במעגל טורי כיחס התנגדויות

כאמור, המעגל טורי, ולכן ההתנגדות השקולה של המעגל היא

$$R_{\text{eq}} = R_L + R$$

והזרם I במעגל נתון על-ידי

$$I = \frac{U}{R_{\text{eq}}} = \frac{U}{R_L + R} \qquad (8\text{-}14)$$

לפי חוק אום, המתח U_L על הצרכן במעגל שבאיור 8-63 – נתון על-ידי

$$U_L = IR_L$$

נציב במשוואה זו את ביטוי הזרם שבמשוואה (8-14), ונקבל כי

$$U_L = IR_L = \frac{U}{R_L + R} R_L = \frac{U}{R_{\text{eq}}} R_L$$

והיחס בין המתח על הצרכן לבין מתח המקור הוא

$$\frac{U_L}{U} = \frac{R_L}{R_{\text{eq}}}$$

כבר קיבלנו שהנצילות נתונה על-ידי (משוואה (8-13)):

$$\eta = \frac{U_L}{U}$$

ומכאן:

$$\eta = \frac{R_L}{R_{eq}} = \frac{R_L}{R_L + R} \qquad (8\text{-}15)$$

ניתן לקבל את הנצילות גם בדרך אחרת. הנצילות נתונה, כאמור, על-ידי

$$\eta = \frac{U_L}{U}$$

נציב במשוואת הנצילות את הערכים המתאימים של המתחים

$$U = I(R_L + R) = IR_{eq}$$

$$U_L = IR_L$$

ונקבל:

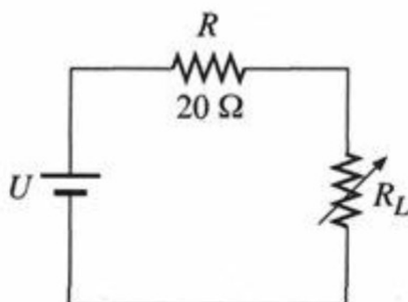
$$\eta = \frac{U_L}{U} = \frac{IR_L}{IR_{eq}} = \frac{R_L}{R_{eq}}$$

כלומר, הנצילות של מעגל טורי – נתונה על-ידי היחס שבין התנגדות הצרכן לבין ההתנגדות השקולה של המעגל כולו. בדוגמה הבאה נראה פי כמה משתנה נצילות המעגל, כאשר התנגדות הצרכן גדלה פי שניים.



דוגמה 8-18

הצרכן במעגל שבאיור 8-64 – הוא נגד משתנה.



איור 8-64

א. חשב את נצילות המעגל, כשהתנגדות הנגד המשתנה היא 20 Ω.

ב. מהי נצילות המעגל, כאשר התנגדות הנגד המשתנה היא 40 Ω?

ג. הראה כי נצילות המעגל תמיד קטנה מ-100%.

פתרון

א. ראינו כי נצילות המעגל המתואר באיור 8-64 נתונה על-ידי משוואה (8-15), כלומר: על-ידי היחס בין התנגדות הצרכן להתנגדות השקולה של המעגל כולו:

$$\eta = \frac{R_L}{R_L + R}$$

נציב את הנתונים ונקבל:

$$\eta = \frac{20}{20+20} = \frac{20}{40} = \frac{1}{2} = 0.5 = 50\%$$

ב. הפעם התנגדות הצרכן היא $40\ \Omega$, לכן נקבל:

$$\eta = \frac{R_L}{R_L + R} = \frac{40}{40+20} = \frac{40}{60} = \frac{2}{3} = 0.667 = 66.7\%$$

אנו רואים כי כאשר התנגדות הצרכן גדלה פי 2 (מ-$20\ \Omega$ ל-$40\ \Omega$), הנצילות גדלה מ-50% ל-66.7%, כלומר, פי 1.33.

ג. נתבונן במשוואת הנצילות:

$$\eta = \frac{R_L}{R_L + R}$$

אפשר לראות כי המכנה $R_L + R$ תמיד גדול מהמונה, כי הוא שווה למונה R_L ועוד R. ולכן המנה $\frac{R_L}{R_L + R}$ תמיד קטנה מ-1. מכאן שנצילות המעגל תמיד קטנה מ-1 (כלומר, מ-100%).



יחידות אנרגיה שימושיות

למדנו כי המכשירים החשמליים בביתנו מחוברים בדרך-כלל במקביל, וכי ההספק הכולל של הצרכנים במעגל מקבילי – שווה לסכום ההספקים של הצרכנים. לכן ההספק הכולל של מכשירי החשמל בביתנו – שווה לסכום ההספקים של המכשירים.

האנרגיה החשמלית מסופקת למכשירי החשמל על-ידי תחנות-הכוח של חברת החשמל, שהן מקורות המתח הגדולים במדינה.

אם-כן, חברת החשמל מספקת אנרגיה חשמלית להפעלת המכשירים החשמליים השונים. כל דירה או בית נחשבים לצרכן של חברת החשמל. ההתנגדות של צרכן כזה היא ההתנגדות השקולה של כל המכשירים בדירה, כלומר: צרכן אחד של חברת החשמל כולל כמה וכמה צרכנים (כלומר, מכשירים חשמליים), המחוברים בדרך-כלל במקביל. ההספק של צרכן חברת החשמל (כלומר, דירה) הוא סכום ההספקים של הצרכנים שבדירה.

אנו משלמים בכל תקופה (מְדֵי חודשיים; ויש המשלמים מְדֵי חודש) לחברת החשמל, על-פי כמות האנרגיה החשמלית שצרכנו. האנרגיה הכוללת, שצרכן חברת החשמל צורך במשך תקופה מסוימת, תלויה בהספק של כל אחד מהמכשירים שהופעלו, ובמשך הזמן שבו הופעל כל אחד מהמכשירים.



דוגמה 8-19

חשב את צריכת החשמל – במשך חודש – של נורה ותנור חימום המחוברים במקביל. נתון כי הספק הנורה הוא 60 W, והיא מאירה במשך 100 שעות בחודש; והספק התנור הוא 2,000 W, והוא מחמם במשך 90 שעות בחודש.

פתרון

האנרגיה החשמלית W_1, שהנורה צורכת, שווה למכפלת הספק הנורה P_1 במשך הזמן t_1 שהנורה מאירה. נהפוך את השעות לשניות, ונקבל כי

$$W_1 = P_1 t_1 = 60 \times 100 \times 3{,}600 = 21{,}600{,}000 \text{ J}$$

והאנרגיה W_2, שהתנור צורך, שווה למכפלת הספק התנור P_2 במשך הזמן t_2, שהתנור פועל. שוב נהפוך את השעות לשניות, ונקבל כי

$$W_2 = P_2 t_2 = 2{,}000 \times 90 \times 3{,}600 = 648{,}000{,}000 \text{ J}$$

האנרגיה הכוללת של שני המכשירים היא

$$W = W_1 + W_2 = P_1 t_1 + P_2 t_2$$
$$= 21{,}600{,}000 + 648{,}000{,}000 = 669{,}600{,}000 \text{ J}$$



בדוגמה 8-19 חישבנו את צריכת החשמל – במשך חודש – של נורה ותנור בלבד, וקיבלנו מאות מיליוני גיול (J). מכאן מובן כי יחידת האנרגיה גיול אינה נוחה לצורך חישוב צריכת החשמל בבתינו. ואמנם, כפי שהסברנו בפרק 6, היחידה השימושית לצריכה ביתית ותעשייתית היא הקילו-ואט שעה (kWh).

כזכור, הקשר בין קילו-ואט שעה לבין הגיול נתון על-ידי

$$1\ \text{kWh} = 1{,}000\ \text{W} \times 3600\ \text{s} = 3{,}600{,}000\ \text{Ws} = 3{,}600{,}000\ \text{J}$$



דוגמה 8-20

בטא ביחידות קילו-ואט שעה את צריכת האנרגיה של הנורה והתנור שבדוגמה 8-19.

פתרון

נפתור שאלה זו בשתי דרכים:

א. בדוגמה 8-19 מצאנו כי האנרגיה, שהנורה והתנור צורכים, היא 669,600,000 J.
נבטא אנרגיה זו ביחידות קילו-ואט שעה:
אנו יודעים כי

$$1\ \text{kWh} = 3{,}600{,}000\ \text{J}$$

לכן האנרגיה, הנצרכת ביחידות קילו-ואט שעה, היא

$$\frac{669{,}600{,}000}{3{,}600{,}000} = 186\ \text{kWh}$$

ב. נבטא את הספקי הנורה והתנור ב-kW, ונחשב מיד בקילו-ואט שעה את האנרגיה שצרכו במשך חודש (בלי לבטא את האנרגיה ביחידות גיול, ובלי להפוך את השעות לשניות). הספק הנורה הוא 60 W, כלומר, 0.06 kW, והספק התנור הוא 2,000 W, כלומר, 2 kW. האנרגיה החשמלית, הנצרכת על-ידי הנורה והתנור, היא

$$\begin{aligned} W &= P_1t_1 + P_2t_2 \\ &= 0.06 \times 100 + 2 \times 90 = 186\ \text{kWh} \end{aligned}$$



חשבון החשמל

באיור 8-65 מופיע צילום של חלק מחשבון החשמל, שנשלח לצרכן של חברת החשמל. סכום האנרגיות, שצרכו המכשירים החשמליים בביתו של הצרכן – מנובמבר 2002 עד ינואר 2003, הוא 1475 kWh (בחשבון החשמל כתוב, שהצריכה בקוט״ש היא 975).

נתונים על צריכת החשמל									סכומי החיוב בש״ח		
מס' ימי החיוב	התעריף	מספר המונה– 4 ספרות אחרונות	סוג הקריאה	תאריכי הקריאה		קריאת המונה		הצריכה בקוט״ש	מחיר לקוט״ש באגורות		סה״כ
				הנוכחית חודש / יום	הקודמת חודש / יום	הנוכחית	הקודמת				אג' ש״ח
55	ביתי	8819		08/01	15/11		83670	1475	37.78		557.26

איור 8-65 חלק מחשבון החשמל שנשלח לצרכן של חברת החשמל

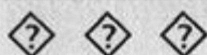
רשום בחשבון כי התשלום בעד הקוט״ש הוא 557.26 ש״ח. כלומר, זהו התשלום בעבור צריכה של 975 קוט״ש. מכאן שמחיר קוט״ש אחד בחודשים אלה יהיה

$$\frac{557.26}{1475} = 0.3778 = \text{37.7 אגורות}$$

וכך כתוב גם בחשבון החשמל. כאשר ידוע המחיר של 1 קוט״ש חשמל, אפשר לחשב את מחיר ההפעלה של מכשירי החשמל השונים, אם ידוע ההספק של מכשירים אלה.

לדוגמה, נחשב את המחיר ששולם בחודש ינואר 2003 בעבור הפעלתם של התנור והנורה שבדוגמה 8-20. כאמור, צריכת האנרגיה בחודש של התנור והנורה היא 186 kWh. המחיר לקוט״ש היה 37.7 אגורות, ולכן המחיר ששולם בעבור הפעלתם של שני המכשירים הוא

$$186 \times 37.7 = \text{7012.2 אגורות} = \text{70.12 ש״ח}$$



שאלות חזרה



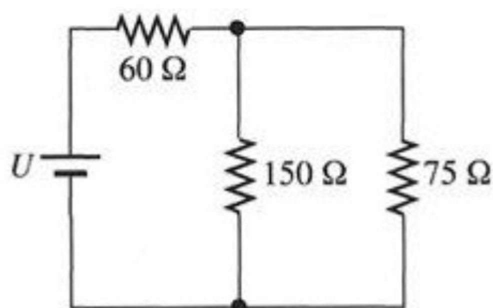
שאלה 8-60

הספק הנגד, שהתנגדותו 150 Ω, במעגל שבאיור8-66 הוא 2 W.

א. חשב את הספק הנגד 75 Ω.

ב. חשב את הספק המעגל.

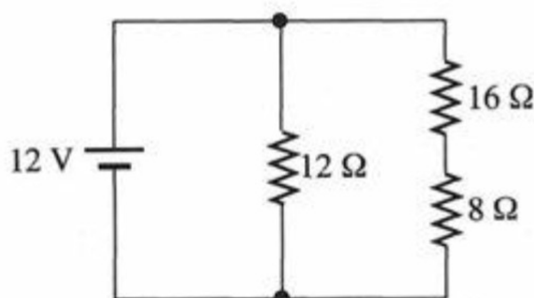
ג. מהו מתח המקור?



איור 8-66

שאלה 8-61

חשב את ההספק של כל נגד ואת הספק המקור במעגל שבאיור 8-67.



איור 8-67

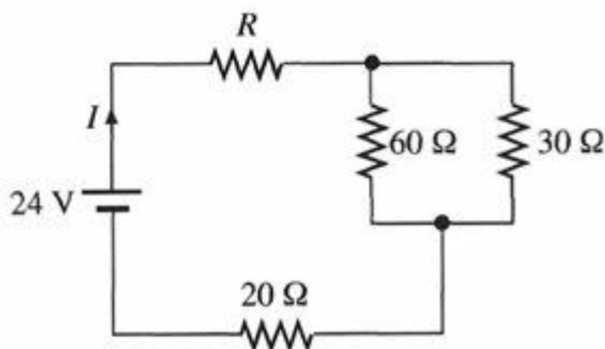
שאלה 8-62

נתון כי הספק המעגל שבאיור 8-68 – הוא 7.2 W.

א. חשב את הזרם I במעגל זה.

ב. חשב את התנגדות הנגד R.

ג. חשב את הספק הנגד R.



איור 8-68

שאלה 8-63

המשפטים הבאים עוסקים בנצילות ובאנרגיה (מושקעת, מופקת-מועילה ומבוזבזת) במעגל חשמלי. סמן ליד כל משפט: **תמיד נכון**, **לעולם לא נכון**, **נכון רק בחלק מהמעגלים**.

א. האנרגיה המופקת-המועילה גדולה מהאנרגיה המושקעת.

ב. הנצילות היא היחס בין האנרגיה המופקת-המועילה לאנרגיה המושקעת.

ג. אם האנרגיה המופקת-המועילה שווה לאנרגיה המבוזבזת, הנצילות היא 50%.

ד. האנרגיה המופקת-המועילה גדולה מהאנרגיה המבוזבזת.

ה. הנצילות אינה גדולה מ-100%.

שאלה 8-64

סמן את הביטויים הנכונים:

ככל שהערך של האנרגיה המופקת-המועילה קרוב יותר לערך של האנרגיה המושקעת, האנרגיה המבוזבזת **קטנה יותר/ גדולה יותר**, והנצילות **קטנה יותר/ גדולה יותר**.

שאלה 8-65

אם כל האנרגיה המושקעת הופכת לאנרגיה מופקת-מועילה, הנצילות היא

א. 50%

ב. 0%

ג. 100%

ד. 1%

שאלה 8-66

תנור חשמלי, שנצילותו 92%, מחובר למקור מתח. התנור מפיק כל יום 60 מיליון ג'ול. מה כמות האנרגיה, שהתנור צורך כל יום?

שאלה 8-67

מכונת כביסה, שהספקה (כלומר, ההספק שהיא צורכת) 2 kW ונצילותה 90%, פועלת במשך 10 דקות.

א. רשום ביחידות kWh את האנרגיה, שמכונת הכביסה צורכת במשך 10 הדקות.

ב. בטא, ביחידות ג'ול, את האנרגיה שמכונת הכביסה צורכת במשך 10 הדקות.

ג. חשב את ההספק המופק-המועיל של מכונת הכביסה.

שאלה 8-68

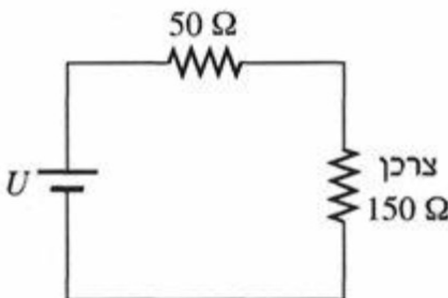
הנצילות של צרכן היא 60%. הצרכן מחובר למקור מתח של 220 V, והזרם בצרכן הוא 10 A.

א. חשב את ההספק, שהצרכן צורך.

ב. מה ההספק המופק-המועיל של הצרכן?

שאלה 8-69

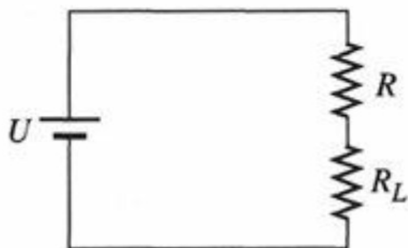
חשב את נצילות המעגל שבאיור 8-69.



איור 8-69

שאלה 8-70

הצרכן R_L במעגל שבאיור 8-70 – מחובר בטור לנגד R.
המשפטים הבאים נוגעים למעגל זה. סמן ליד כל משפט: **נכון, לא נכון**.



איור 8-70

א. ככל ש-R_L גָדֵל, גם הנצילות גְדֵלָה.

ב. אם $R_L = R$, נצילות המעגל היא 100%.

ג. אם $R_L = R$, נצילות המעגל היא 50%.

ד. אם $R_L > R$, נצילות המעגל גדולה מ-100%.

ה. אם R_L גדל פי 2, גם הנצילות גדלה פי 2.

ו. הנצילות תלויה רק בשתי ההתנגדויות R ו-R_L, אך לא במתח המקור.

שאלה 8-71

נתון כי המתח על הנגד R במעגל שבאיור 8-70 – הוא 24 V, והמתח על הנגד R_L הוא 8 V.
מהי נצילות המעגל?

שאלה 8-72

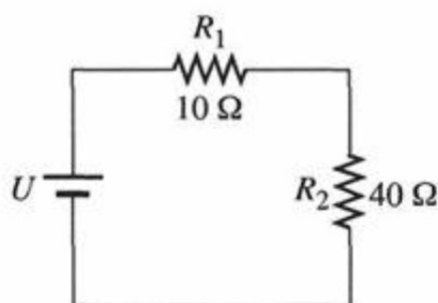
הנה רשימה חלקית של מכשירים חשמליים, המחוברים בבית. ליד כל מכשיר רשום ההספק שלו, ומשך הזמן – בשעות – שהמכשיר פעל במשך חודש. חשב את האנרגיה החשמלית הכוללת – ביחידות kWh – שנצרכה, באותו חודש, על-ידי כל אחד ממכשירים אלה.

המכשיר	הספק המכשיר	משך פעולת המכשיר (בשעות)
מקלט טלוויזיה	150 W	150
מחשב	60 W	120
תנור חימום	3,000 W	40

שאלה 8-73

א. חשב את נצילות המעגל שבאיור 8-71, בהנחה כי R_2 הוא הצרכן.

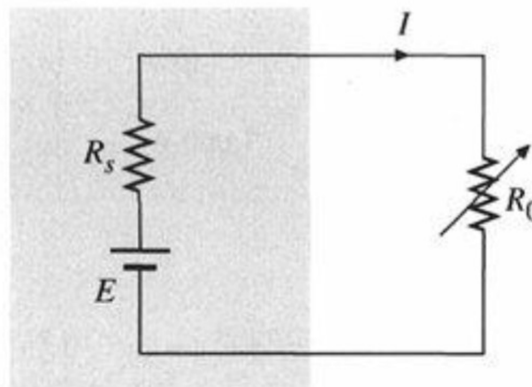
ב. חזור על החישוב, בהנחה כי R_1 הוא הצרכן.



איור 8-71

8.7 העברת הספק מְרַבִּי לצרכן

באיור 8-72 נתון מעגל טורי, המורכב ממקור מתח ממשי – ומצרכן R_0, שהתנגדותו ניתנת לשינוי (כאמור, מקור מתח ממשי מיוצג על-ידי מקור מתח אידיאלי E והתנגדות פנימית R_s). לפנינו אפוא מעגל טורי, הכולל שני נגדים: נגד קבוע R_s ונגד משתנה R_0. ברצוננו למצוא את התנגדות הצרכן R_0, שעבורו ההספק P – המועבר לצרכן – יהיה מְרַבִּי. לדרישה זו, לקבלת הספק מְרַבִּי, יש חשיבות רבה במערכות חשמליות שונות.



איור 8-72 מעגל טורי הכולל מקור מתח ממשי וצרכן

עלינו למצוא את הקשר בין R_0, הניתן לשינוי, לבין R_s, כך שההספק P יהיה מְרַבִּי. ההספק P, שהוא הספק הצרכן, נתון – לפי סעיף 8.6 – על-ידי

$$P = I^2 R_0 \qquad (8\text{-}16)$$

כאשר I הוא הזרם במעגל.

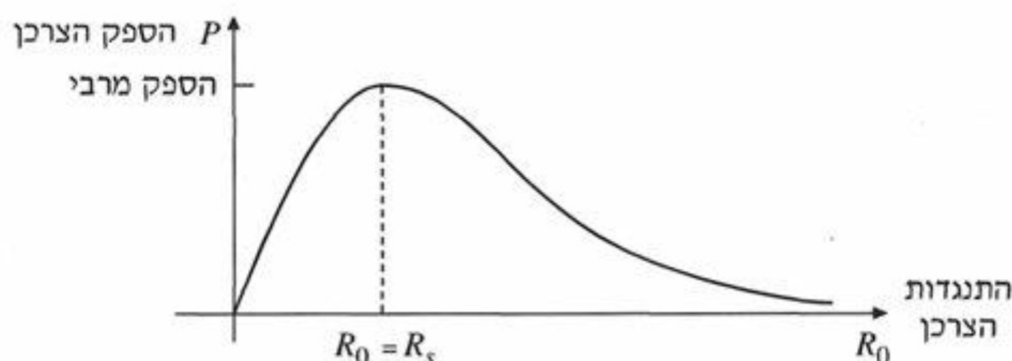
לפי חוק אום, הזרם במעגל נתון על-ידי

$$I = \frac{E}{R_s + R_0} \qquad (8\text{-}17)$$

נציב במשוואה (8-16) את ביטוי הזרם שבמשוואה (8-17), ונקבל:

$$P = I^2 R_0 = \left(\frac{E}{R_s + R_0}\right)^2 R_0 = \frac{E^2 R_0}{(R_s + R_0)^2} \qquad (8\text{-}18)$$

אנו מחפשים אפוא את המקסימום של ההספק P המועבר לצרכן – בתלות בהתנגדות R_0. נמדוד את ההספק P בתלות בהתנגדות המשתנה R_0, ונקבל את הגרף שבאיור 8-73.



איור 8-73 ההספק P המועבר לצרכן – בתלות בהתנגדות R_0 של הצרכן, המחובר למקור מתח, שהתנגדותו הפנימית היא R_s

בגרף זה ניתן לזהות שני תחומים: האחד משמאל להתנגדות R_0, והשני – מימין להתנגדות זו.

בתחום השמאלי – ההספק גָדֵל, כל עוד התנגדות הצרכן קטנה מהתנגדות המקור.
ובתחום הימני – ההספק קָטֵן, כשהתנגדות הצרכן גדולה מהתנגדות המקור.

ובכן, ההספק גָדֵל בתחום השמאלי, מגיע למקסימום כשהתנגדות הצרכן שווה להתנגדות הפנימית של מקור המתח. בתחום הימני – ההספק הולך וקָטֵן. כשהתנגדות הצרכן הולכת וגְדֵלָה, ההספק הולך וקָטֵן. כאמור, ההספק המְרַבִּי, המועבר לצרכן, מתקבל כאשר

$$R_s = R_0$$

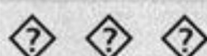
המשוואה $R_s = R_0$ היא אפוא התנאי להעברת הספק מְרַבִּי לצרכן. ניתן להוכיח זאת באופן מתמטי. לשם כך נחזור ונתבונן במשוואה (8-18):

$$P = \frac{E^2 R_0}{\left(R_s + R_0\right)^2}$$

במשוואה זו נתון ההספק P, המועבר לצרכן, בתלות בהתנגדות R_0 של הצרכן. תנאי הכרחי לקבלת מקסימום של פונקציה, הוא התאפסות הנגזרת של הפונקציה. ניתן להראות כי המקסימום יתקבל כאשר $R_s = R_0$. ההוכחה חורגת ממסגרת לימודינו כאן.



שאלות חזרה



שאלה 8-74

א. התנגדות הנגד R_s באיור 8-72 – היא $16\ \Omega$. מה צריכה להיות התנגדות הצרכן R_0, שעבורו ההספק המועבר לצרכן – יהיה מְרַבִּי?

ב. נתון כי הכא״מ של מקור הוא $9\ V$. כמה הספק יועבר לצרכן, הנתון בסעיף הקודם, כשהתנגדות הצרכן שווה להתנגדות הפנימית של מקור המתח?

שאלה 8-75

א. התנגדות הנגד R_s באיור 8-72 – היא $8\ \Omega$. נתון כי ההספק המועבר לצרכן – מְרַבִּי. מה התנגדות הצרכן?

ב. מה נצילות המעגל?

שאלה 8-76

א. משנים את התנגדות הצרכן שבאיור 8-72. בטבלה הבאה נתונים ערכים שונים של התנגדות הצרכן. חשב את נצילות המעגל לגבי כל אחת מההתנגדויות הנתונות של הצרכן.

התנגדות הצרכן	$R_s = 0.2\ R_0$	$R_s = 0.5\ R_0$	$R_s = R_0$	$R_s = 2R_0$	$R_s = 5R_0$
נצילות					

ב. מה הנצילות, כשהספק מְרַבִּי מועבר לצרכן?

ג. האם הנצילות מְרַבִּית, כשהספק מְרַבִּי מועבר לצרכן? נמק.

שאלה 8-77

א. משנים את התנגדות הצרכן שבאיור 8-72. בטבלה הבאה נתונים ערכים שונים של התנגדות הצרכן. הנח כי הכא״מ של המקור הוא $1\ V$, וההתנגדות הפנימית של המקור היא $1\ \Omega$, וחשב – בכל מקרה – את הספק המעגל ואת ההספק המועבר לצרכן.

התנגדות הצרכן	$R_s = 0.2\ R_0$	$R_s = 0.5\ R_0$	$R_s = R_0$	$R_s = 2R_0$	$R_s = 5\ R_0$
הספק המעגל					
ההספק המועבר לצרכן					

ב. מה ההספק המְרַבִּי המועבר לצרכן?

ג. האם ההספק המְרַבִּי, המועבר לצרכן, הוא גם ההספק המְרַבִּי של המעגל? נמק.

8.8 כא"מ ומקורות מתח

בפרקים הקודמים הנחנו כי לכל אחד ממקורות המתח במעגל, יש מתח קבוע, שאינו תלוי בהתנגדויות ובזרם שבמעגל. אם מחברים צרכן למקור מתח, הרי שגם המתח על הצרכן קבוע, על-פי הנחה זו.

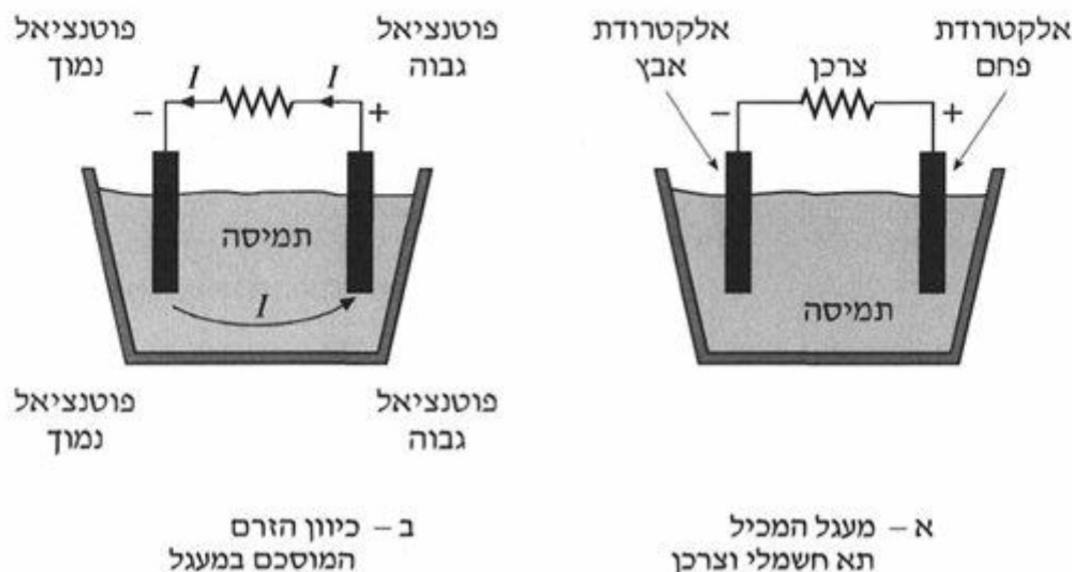
בפרק זה נבדוק הנחה זו. נדון כאן רק במקור מתח, אשר המתח נוצר בו על-ידי הפרדת מטענים, בתהליך כימי כמו זה שלמדנו בפרק 2. במקורות מתח מסוגים אחרים, נעסוק בשלבים מתקדמים יותר של לימודינו.

8.8.1 התא החשמלי והזרם במעגל

נתחיל את דיוננו במעגל פשוט, המכיל צרכן אחד. מקור המתח במעגל זה, הוא התא החשמלי, שעליו למדנו בסעיף 2.2. אלקטרודה אחת של התא - עשויה פחם, והאלקטרודה השנייה עשויה אבץ.

באיור 8-74א מתואר התא החשמלי, המחובר לצרכן. כאמור, כיוון הזרם המוסכם במעגל זה, המכיל מקור מתח וצרכן, הוא מההדק החיובי של מקור המתח - דרך הצרכן - אל ההדק השלילי של מקור המתח. ואילו בתוך התא יש מעבר מטענים חיוביים מההדק השלילי - אל ההדק החיובי. כיוון הזרם המוסכם במעגל, מתואר באיור 8-74ב.

נחלק לשני חלקים את מסלול התנועה של המטענים במעגל. בחלק אחד של המסלול, נעים המטענים - דרך התֵּילִים המוליכים והצרכן - ואילו בחלק השני של המסלול - יש מעבר מטענים בתא החשמלי. בהמשך נזניח את התנגדות התֵּילִים המוליכים במעגל.



איור 8-74 מעגל חשמלי וכיוון הזרם המוסכם בו

כאמור, הזרם המוסכם נע מנקודה - שבה הפוטנציאל גבוה, לנקודה שבה הפוטנציאל נמוך. אבל בתוך התא החשמלי יש מעבר של מטענים חיוביים – מההדק השלילי להדק החיובי, כלומר: מפוטנציאל נמוך לפוטנציאל גבוה. אם-כן, בחלק זה של המסלול, **יש צורך להשקיע אנרגיה במטענים חיוביים**.

אנרגיה זו מאפשרת את תנועת המטענים במעגל כולו, כי על-ידי השקעת האנרגיה, יכול להימשך התהליך של הפרדת מטענים בתא. וכתוצאה מכך, ממשיך להתקיים הפרש פוטנציאלים בין ההדק החיובי והשלילי של התא. אנרגיה זו – מקורה בתהליכים כימיים, המתרחשים בתא החשמלי. ולכן נוהגים לקרוא לאנרגיה זו – **אנרגיה כימית**.

8.8.2 מתח הדקים, כא"מ והתנגדות פנימית

נניח תחילה כי מעבר המטענים בתוך התמיסה, בין הדקי מקור המתח (איור 8-74ב), נעשה ללא התנגדות כלשהי. כאמור, במקרה כזה צריך מקור המתח להוסיף אנרגיה למטענים (חיוביים), רק כדי להעלות את המטענים מפוטנציאל נמוך לפוטנציאל גבוה, כלומר: להתגבר על המתח שבין ההדקים של המקור. מתח זה נקרא **מתח ההדקים של המקור**.

מתח ההדקים של המקור יכול לגרום לתנועת המטענים דרך הצרכן, המחובר בין הדקי המקור. מאחר שמתח נתון על-ידי אנרגיה ליחידת מטען, ניתן לראות את מתח ההדקים של המקור, כאנרגיה המושקעת בהנעת יחידת מטען – דרך **הצרכן**.

הנחנו כי מעבר המטענים בתוך התמיסה, נעשה ללא התנגדות כלשהי. אך במציאות יש התנגדות למעבר המטענים בתוך התמיסה. מקור המתח צריך להשקיע אנרגיה, כדי להתגבר על ההתנגדות למעבר המטענים בתוך התא עצמו, נוסף על העלאת המטענים (החיוביים) מפוטנציאל נמוך לפוטנציאל גבוה יותר.

כאמור, המעגל החשמלי מכיל - למעשה - את מקור המתח ואת הצרכן. האנרגיה, שהמקור צריך להשקיע בהנעת יחידת מטען סביב המעגל החשמלי כולו, נקראת הכוח האלקטרו-מניע של מקור המתח, ובקיצור: **הכא"מ** של מקור המתח. הכא"מ מסומן על-ידי E.

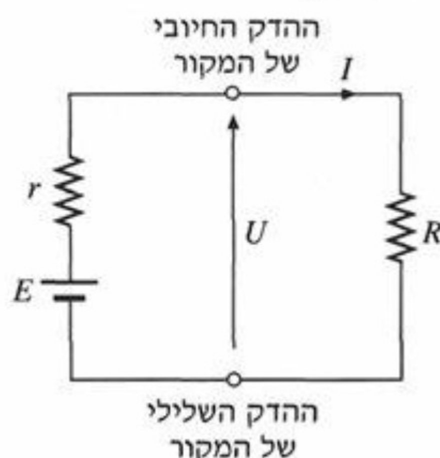
כוח אלקטרו-מניע אינו שם מתאים. שם זה כולל את המלה **כוח**, אך כוח אלקטרו-מניע אינו כוח, אלא אנרגיה ליחידת מטען. שם זה מקובל בתורת החשמל, וגם אנו נשתמש בו. אך במקום להשתמש בשם המלא, נקרא לו בהמשך רק בראשי התיבות שלו - **כא"מ**.

יחידת הכא"מ היא אנרגיה ליחידת מטען, כלומר: וולט (V). מכאן שיחידת הכא"מ ויחידת המתח הן זהות, אך הכא"מ והמתח הם גדלים שונים. כאמור, הכא"מ יכול לגרום לתנועת המטענים במעגל כולו, ואילו המתח בין ההדקים גורם לתנועת המטענים רק דרך הצרכן במעגל.

הכא"מ של מקור מתח הוא תכונה אופיינית של המקור. תכונה זו תלויה באלקטרודות של התא ובתמיסה, הנמצאת בתא. אם-כן, אנו יכולים לדבר על מקור בעל כא"מ של 9 V, למשל.

כא"מ הוא רק אחת התכונות האופייניות של המקור. כאמור, יש בתמיסה התנגדות למעבר המטען מההדק השלילי להדק החיובי. התנגדות זו נקראת **התנגדות פנימית**, והיא מסומנת על-ידי r. ההתנגדות הפנימית היא תכונה אופיינית נוספת של המקור.

אנו נניח כי ההתנגדות הפנימית קבועה. אם-כן, נייצג את ההתנגדות הפנימית על-ידי נגד, שהתנגדותו r. למעשה, אותה כמות מטען עוברת ביחידת זמן גם בצרכן וגם בתמיסה, ולכן נוכל לומר כי אותו זרם זורם בצרכן ובתמיסה. מכאן נסיק כי המעגל שבאיור 8-74ב, הוא מעגל טורי, שבו הצרכן R מחובר בטור להתנגדות הפנימית r. מעגל טורי זה מתואר באיור 8-75.



איור 8-75 מעגל טורי המכיל את הצרכן R ואת ההתנגדות הפנימית r (תרשים המעגל שבאיור 8-74ב)

נשתמש בחוק המתחים של קירכהוף לגבי המעגל שבאיור 8-75, ונקבל כי הכא"מ E נתון על-ידי

$$E = U + Ir \qquad (8\text{-}19)$$

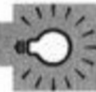
נעביר את מתח ההדקים U לאגף שמאל, ואת הכא"מ E נעביר לאגף ימין, ונקבל:

$$U = E - Ir \qquad (8\text{-}20)$$

המתח על הצרכן R במעגל זה, נתון – לפי חוק אום – על-ידי מכפלת הזרם I (שהוא זרם המעגל הטורי וגם הזרם בצרכן R) בהתנגדות הנגד, כלומר: RI. מתח זה שווה למתח ההדקים של המקור, כפי שניתן להיווכח מהמעגל שבאיור 8-75.

לפי משוואה (8-19), הזרם I הנתון על-ידי $I = \frac{E-U}{r}$. ניווכח בהמשך כי זרם זה נתון גם על-ידי

$$I = \frac{E}{R+r} \qquad (8\text{-}21)$$



דוגמה 8-21

נתון כי הכא"מ של מקור המתח במעגל שבאיור 8-75, הוא 3 V. ההתנגדות הפנימית של המקור, היא 0.2 Ω, והתנגדות הצרכן – 8 Ω.

א. חשב את הזרם במעגל.

ב. חשב את המתח על הצרכן.

ג. מה מתח ההדקים של המקור?

פתרון

א. כדי למצוא את הזרם I במעגל שבאיור 8-75, נשתמש בחוק אום, ונבטא את המתח U על הצרכן, באמצעות הזרם בצרכן (ובמעגל הטורי כולו): $U = IR$. נציב זאת בחוק המתחים של קירכהוף, ונקבל כי

$$E = U + Ir = IR + Ir = I(R + r)$$

ומכאן:

$$I = \frac{E}{R+r} = \frac{3}{8+0.2} = 0.3659 \text{ A} = 365.9 \text{ mA}$$

ב. לפי חוק אוס, המתח על הצרכן נתון – כאמור – על-ידי

$$IR = 0.3659 \times 8 = 2.93 \text{ V}$$

ג. מתח ההדקים של המקור, שווה למתח על הצרכן. נוכל להיווכח בכך, אם נציב במשוואה $U = E - Ir$ את הנתונים. ובכן,

$$U = E - Ir = 3 - 0.3659 \times 0.2 = 2.93 \text{ V}$$

אנו רואים כי $U = IR$.



ראינו כי כאשר מחברים צרכן למקור מתח, כפי שמתואר באיור 8-75, מתח ההדקים של המקור נתון על-ידי $U = E - Ir$. ומכאן נקבל כי

$$E - U = Ir$$

כלומר, ההפרש בין הכא״מ E למתח ההדקים U, שווה למתח Ir על ההתנגדות הפנימית. על-סמך דיוננו נוכל להסיק, כי מתח ההדקים במעגל, כדוגמת זה שבאיור 8-75, אינו גדול מהכא״מ. כן נוכל להסיק, כי ככל שהזרם במעגל קטן יותר, גם ההפרש בין הכא״מ למתח ההדקים, יהיה קטן יותר.

מה יהיה הקשר בין הכא״מ ומתח ההדקים, כשלא יזרום זרם במעגל?

אם לא יזרום זרם במעגל $(I = 0)$, נקבל מהמשוואה $E - U = Ir$, כי $E = U$, כלומר: מתח ההדקים של המקור, שווה לכא״מ. אם שום צרכן לא מחובר בין הדקי המקור, לא זורם זרם במעגל. מתח ההדקים, לפי הסברנו, יהיה שווה במקרה זה לכא״מ. נסכם:

כשהצרכן מנותק במעגל שבאיור 8-75, מתח ההדקים של המקור, שווה לכא"מ.

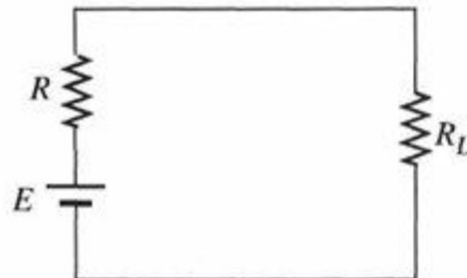
גם אילו ההתנגדות הפנימית של המקור, הייתה שווה לאפס, נקבל מהמשוואה $E - U = Ir$, כי $E = U$. כלומר: מתח ההדקים של המקור, שווה לכא״מ. ההתנגדות הפנימית של מקור שווה לאפס, רק במצב אידיאלי, שאינו קיים במציאות. אם-כן, למקור מתח, שהתנגדותו הפנימית שווה לאפס, קוראים **מקור מתח אידיאלי**.

לעומת זאת, מקור מתח ממשי, כלומר: מקור מתח הקיים במציאות, הוא בעל התנגדות פנימית. במעגלים מעשיים רבים, שבהם ההתנגדות הפנימית קטנה מאוד (זניחה) ביחס להתנגדות הצרכן, מניחים כי $r \cong 0$, ומכאן שמתח ההדקים קבוע ושווה בערך לכא״מ, כלומר: $U \cong E$.

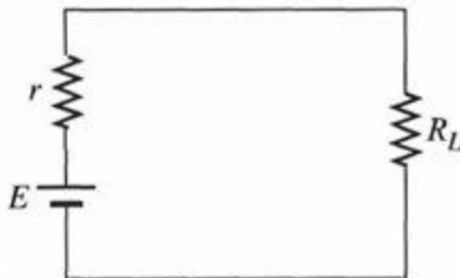
כאמור, אנו מניחים שההתנגדות הפנימית קבועה. אך במציאות, כאשר המקור (כלומר: התא, הסוללה, המצבר) מתיישן, גדלה ההתנגדות הפנימית שלו. כתוצאה מכך קטן מתח ההדקים, עד שהצרכן - המחובר למקור - יפסיק לפעול.

8.8.3 ההתנגדות הפנימית של המקור, התנגדות הצרכן ונצילות המעגל

מצאנו כי הנצילות של מעגל טורי נתונה על-ידי היחס שבין התנגדות הצרכן לבין ההתנגדות השקולה של המעגל כולו. ראינו באיור 8-74ב ובאיור 8-75 כי גם מעגל, המכיל תא חשמלי וצרכן, הוא מעגל טורי. באיור 8-76 נתונים שני מעגלים טוריים: המעגל שבאיור 8-76א מכיל נגד R וצרכן R_L, והמעגל שבאיור 8-76ב – מכיל את ההתנגדות הפנימית r ואת התנגדות הצרכן R_L.



א – מעגל טורי

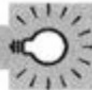


ב – מעגל המכיל תא חשמלי וצרכן

איור 8-76 שני מעגלים טוריים

כאמור, הנצילות של מעגל טורי – נתונה על-ידי משוואה (8-15): $\eta = \frac{R_L}{R + R_L}$, ומכאן שנצילות מעגל, המכיל תא חשמלי וצרכן, נתונה על-ידי

$$\eta = \frac{R_L}{r + R_L} \qquad (8\text{-}22)$$



דוגמה 8-22

נתון כי ההתנגדות הפנימית של מקור המתח שבאיור 8-76ב – היא $0.2\ \Omega$. מה תהיה נצילות המעגל, אם התנגדות הצרכן תהיה...

א. קטנה מאוד (״קָצָר״)?

ב. גדולה מאוד (״אינסופית״; נֶתֶק)?

ג. $0.2\ \Omega$?

פתרון

א. נציב $R_L = 0$ במשוואה (8-22), $\eta = \frac{R_L}{r+R_L}$, ונקבל:

$$\eta = \frac{0}{r+0} = 0$$

ב. אם התנגדות הצרכן R_L גדולה מאוד ביחס להתנגדות הפנימית של מקור המתח, הרי שהסכום $r+R_L$ קרוב מאוד להתנגדות הצרכן R_L. במכנה של משוואת הנצילות, $\eta = \frac{R_L}{r+R_L}$, נקבל בקירוב R_L, והנצילות תהיה כמעט 1 (כלומר: כמעט 100%).

ג. נציב במשוואת הנצילות (8-22) את הנתונים, ונקבל:

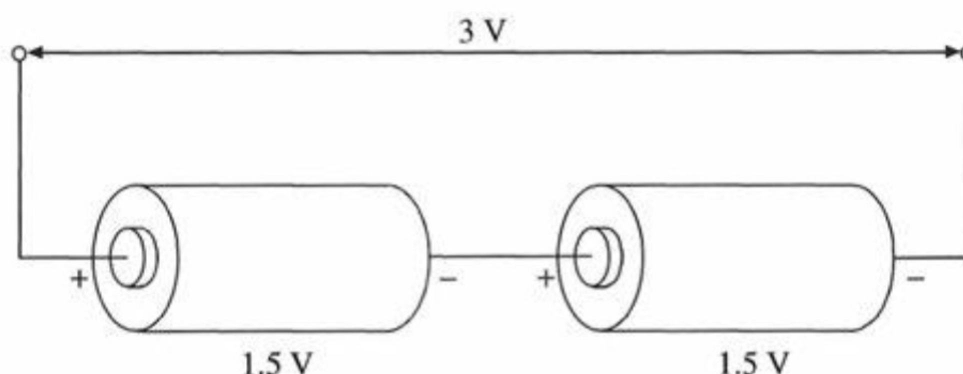
$$\eta = \frac{R_L}{r+R_L} = \frac{0.2}{0.2+0.2} = \frac{0.2}{0.4} = 0.5 = 50\%$$

התנגדות הצרכן שווה – במקרה זה – להתנגדות הפנימית של מקור המתח, והנצילות שווה, כמובן, ל-50%.



8.8.4 הכא"מ השקול וההתנגדות הפנימית השקולה של מקורות מתח המחוברים בטור

לפעמים קורה, שמקור מתח יחיד אינו מספיק להזנת צרכן (או צרכנים). במקרים מסוימים דרושים לנו מתח, זרם והספק גדולים יותר מאלה שמקור יחיד מסוגל לספק. כדי להזין צרכן, אפשר לחבר מספר תאים זה לזה באותו מעגל. ההתקן המתקבל קרוי לעתים **סוללה** (battery). אחת האפשרויות היא לחבר את התאים האלה בטור. חיבור בטור של שני תאים הוא חיבור, שבו ההדק החיובי של תא אחד, מחובר להדק השלילי של התא השני (איור 8-77).



איור 8-77 שני תאים מחוברים בטור

כאמור, הכא״מ הוא האנרגיה, שהתא החשמלי משקיע ביחידת מטען, כדי להעלותה מפוטנציאל נמוך לפוטנציאל גבוה יותר, תוך התגברות על ההתנגדות הפנימית של התא. כאשר תאים אחדים מחוברים בטור, כל תא משקיע במטען אנרגיה – בהתאם לכא״מ שלו.

האנרגיה, המושקעת על-ידי כל התאים ביחד, שווה לסכום האנרגיות, שכל תא בנפרד מעניק למטען. לכן, הכא״מ השקול E_{eq} של מקור המתח, הוא סכום הכא״מים של התאים הבודדים. אם נתונים n תאים מחוברים בטור, שהכא״מים שלהם $E_1, E_2, ..., E_n$ (בהתאמה), הכא״מ השקול שלהם הוא

$$E_{eq} = E_1 + E_2 + ... + E_n$$

כל מקור מתח נוסף, המחובר בטור, מגדיל את הכא״מ השקול E_{eq}. דוגמה לחיבור בטור של שני מקורות מתח של 1.5 V – ליצירת מקור של 3 V – מתוארת באיור 8-77. המצבר הוא

מקור מתח, שנבנה על-ידי חיבור בטור של מספר תאים חשמליים. למשל, מצבר של 12 V במכונית – בנוי משישה תאים (איור 8-78).



איור 8-78 מצבר של מכונית

הן הסוללה והן המצבר מורכבים מתאים. אם-כן, מה ההבדל בין סוללה למצבר?

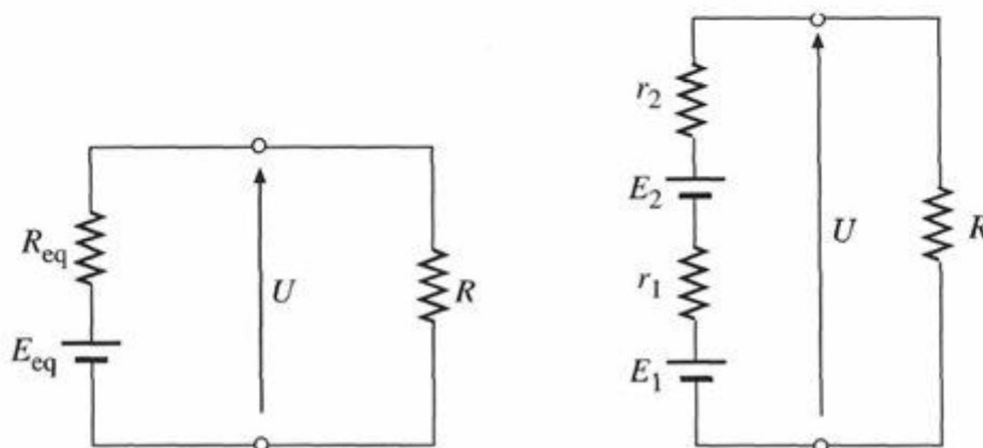
הסוללות נקראות **תאים ראשוניים** (primary cells). המטענים בתא ראשוני נתקלים בהתנגדות לתנועתם דרך האלקטרוליט; וכאשר התא מתיישן, גְדֵלָה התנגדותו הפנימית. כתוצאה מכך, קָטֵן מתח ההדקים של התא. ובכן, התא מפסיק, בעצם, לפעול.

לעומת זאת, יש תאים (או סוללות), הניתנים לטעינה מחדש, באמצעות זרם חשמלי. תאים כאלה נקראים **תאים משניים** (secondary cells), או **מצברים**, או **סוללות נטענות**. לתא משני במכונית – מקובל לקרוא בשם **מצבר**, ולתא משני במכשירים אלקטרוניים (טלפון נייד וטלפון אלחוטי, למשל) – מקובל לקרוא בשם **סוללה נטענת**.

לאחר שנחלש הכא"מ, הנוצר בין האלקטרודות של תא משני, ניתן לחזור ולטעון תא זה, ולהחזיר אותו למצבו ההתחלתי – שלפני התחלת השימוש. ניתן לחזור שוב ושוב על תהליך זה, עד שגם תא כזה מפסיק לפעול.

מכל-מקום, לא תמיד מקפידים על ההבחנה בשימוש במונחים אלה, והפירוש של BATTERY יכול להיות "סוללה" או "מצבר". לפי ההֶקְשֵר ניתן לדעת את הכוונה של שימושים אלה.

מאחר שלכל אחד מן התאים, המרכיבים את מקור המתח, יש התנגדות פנימית, גם למקור המתח כולו יש התנגדות פנימית. את ההתנגדות הפנימית של מקור מתח, המורכב מכמה תאים, נְכַנֶּה בשם התנגדות פנימית שקולה. לצורך חישוב התנגדות זו של תאים המחוברים בטור, נתבונן במקרה הפשוט ביותר: חיבור טורי של שני תאים (איור 79-8א).



א – שני תאים בטור   ב – מקור המתח השקול של שני תאים בטור

איור 8-79 שני תאים בטור – והשקול שלהם

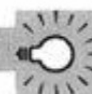
ההתנגדויות הפנימיות מחוברות בטור, ולכן ההתנגדות השקולה שלהן, r_{eq}, היא

$$r_{eq} = r_1 + r_2$$

באיור 79-8ב מתוארים הכא״מ השקול וההתנגדות הפנימית השקולה של שני התאים. באופן כללי, ההתנגדות הפנימית השקולה r_{eq} של n תאים, המחוברים בטור, היא

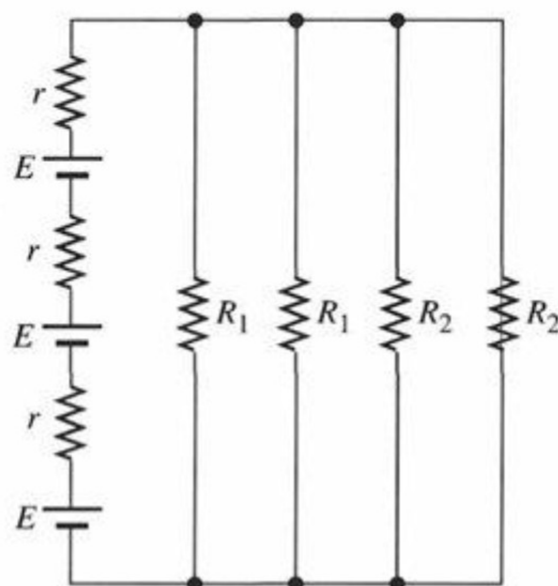
$$r_{eq} = r_1 + r_2 + ... + r_n$$

כאשר $r_1, r_2, ..., r_n$ הן ההתנגדויות הפנימיות של n התאים.



דוגמה 8-23

למצבר מכונית מחוברים במקביל ארבעה פנסים (איור 80-8). המצבר מורכב משישה תאים, שהכא״מ של כל אחד מהם הוא $2\ V$. ההתנגדות הפנימית של כל תא היא $0.3\ \Omega$. ההתנגדות של כל פנס קדמי היא $R_1 = 3\ \Omega$, וההתנגדות של כל פנס אחורי היא $R_2 = 24\ \Omega$. נתון כי כל הפנסים מאירים, ורק הם מחוברים למצבר. מהו הזרם שהמצבר מספק לפנסים?



איור 8-80

פתרון

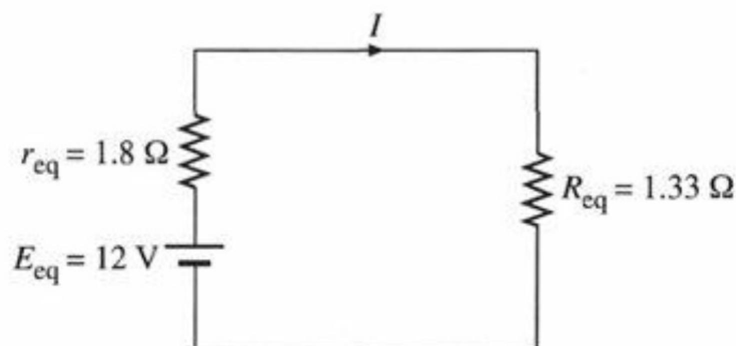
הכא״מ E_{eq} של המצבר הוא $E_{eq} = 6 \times 2 = 12\ \text{V}$. ההתנגדות הפנימית r_{eq} של המצבר היא $r_{eq} = 6 \times 0.3 = 1.8\ \Omega$. ההתנגדות השקולה R_{eq} של הפנסים, המחוברים במקביל, נתונה על-ידי

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{24} + \frac{1}{24} = \frac{18}{24}\,S$$

ומכאן:

$$R_{eq} = \frac{24}{18}\,\Omega \ = 1.32\Omega$$

המעגל המתקבל מן המעגל שבאיור 8-80, מתואר באיור 8-81.



איור 8-81

הזרם I, המסופק לפנסים, הוא

$$I = \frac{E_{eq}}{R_{eq} + r_{eq}} = \frac{12}{1.33 + 1.8} = 3.83 \text{ A}$$



עד כה עסקנו בחיבור טורי של תאים, כך שההדק החיובי של תא אחד – מחובר להדק השלילי של התא האחר. ניתן לחבר, בצורה אחרת, שני תאים זה לזה, כך שההדק החיובי של תא אחד – יחובר להדק החיובי של התא השני, או שההדק השלילי של תא אחד – יחובר להדק השלילי של התא השני, כמתואר באיור 8-82. חיבור כזה נקרא חיבור אנטי-טורי.



איור 8-82 חיבור אנטי-טורי של תאים

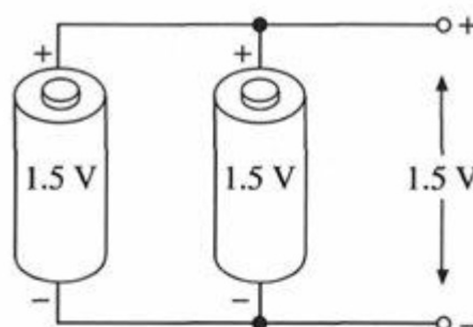
בכל אחת משתי צורות החיבור, המתוארות באיור 8-82, הכא״מ של תא אחד – מנוגד לכא״מ של התא השני, ולכן גודל הכא״מ השקול E_{eq} הוא

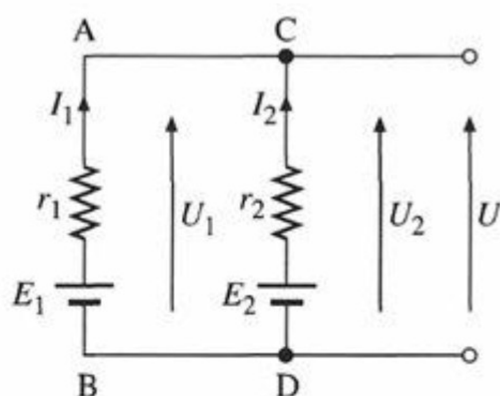
$$E_{eq} = E_1 - E_2$$

קוטביות המקור כולו תהיה כקוטביות התא, שהכא״מ שלו גדול יותר. ההתנגדות הפנימית השקולה של שני התאים שווה, כמובן, לסכום ההתנגדויות הפנימיות של התאים.

8.8.5 הכא"מ השקול וההתנגדות הפנימית השקולה של מקורות מתח המחוברים במקביל

חיבור במקביל של מקורות מתח – הוא חיבור, שבו ההדקים החיוביים של המקורות מחוברים זה לזה, ויוצרים קוטב חיובי משותף; וההדקים השליליים של אותם מקורות מתח – מחוברים זה לזה, ויוצרים קוטב שלילי משותף (איור 8-83).





א – תאים מחוברים במקביל

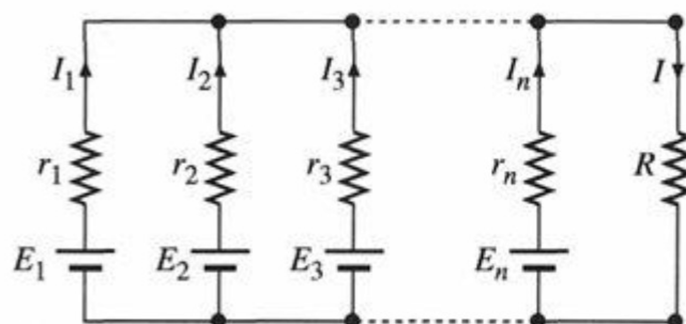
ב – תרשים המעגל

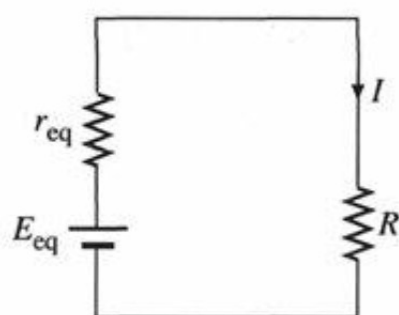
איור 8-83 תאים בחיבור מקבילי

לשני התאים, המחוברים במקביל באיור 8-83א, יש אותו כא״מ, ואין זה מקרה. לא רצוי לחבר במקביל מקורות מתח, שיש להם כא״מ שונה. אם נחבר במקביל שני תאים, שאין להם אותו כא״מ, ייווצר מתח בין התאים, ויזרום ביניהם זרם, גם כאשר המעגל פתוח. זרם זה לא יביא לנו תועלת. אנרגיה חשמלית תתבזבז, והתאים יתרוקנו. יְתֵרָה מזאת, בגלל ההתנגדות הפנימית הקטנה, בדרך-כלל, של התאים, ייווצר בתוך התאים זרם גדול ביותר, העלול להרוס את התאים.

אם נחבר צרכן לתאים – בעלי אותו כא״מ והמחוברים במקביל – כמתואר באיור 8-84, נקבל – לפי חוק הזרמים של קירכהוף – כי הזרם I בצרכן הוא סכום הזרמים, שמקורות המתח מספקים:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \ldots + I_n$$





א – מעגל הכולל *n* תאים המחוברים במקביל – וצרכן

ב – מקור מתח שקול לתאים שמימין

איור 8-84 תאים מחוברים במקביל

כל מטען במעגל ינוע עקב העבודה, שמשקיע בו אחד התאים. מטען מסוים ינוע במעגל עקב הכא״מ של תא אחד, ומטען אחר ינוע במעגל עקב הכא״מ של אותו תא, או של תא אחר. אך מאחר שהכא״מ של התאים הוא זהה, כל מטען במעגל ינוע עקב כא״מ זהה. הכא״מ השקול E_{eq} של מקור מתח, המורכב מ-n תאים בעלי אותו כא״מ, שווה אפוא לכא״מ של כל אחד מהתאים הללו:

$$E_{eq} = E_1 + E_2 + E_3 + \ldots + E_n$$

כאמור, ההתנגדות הפנימית השקולה של מקורות מתח, המחוברים בטור, חושבה על-פי נוסחת ההתנגדות השקולה של נגדים בטור.

באופן דומה, מחשבים את ההתנגדות הפנימית השקולה של מקורות מתח – המחוברים במקביל, ובעלי כא״מ זהה – על-פי נוסחת ההתנגדות השקולה של נגדים במקביל. נסמן את ההתנגדויות הפנימיות של n התאים – על-ידי $r_1, r_2, \ldots, r_n$. ההתנגדות הפנימית השקולה r_{eq} של n התאים, המחוברים במקביל, נתונה על-ידי

$$\frac{1}{r_{eq}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \ldots + \frac{1}{r_n}$$

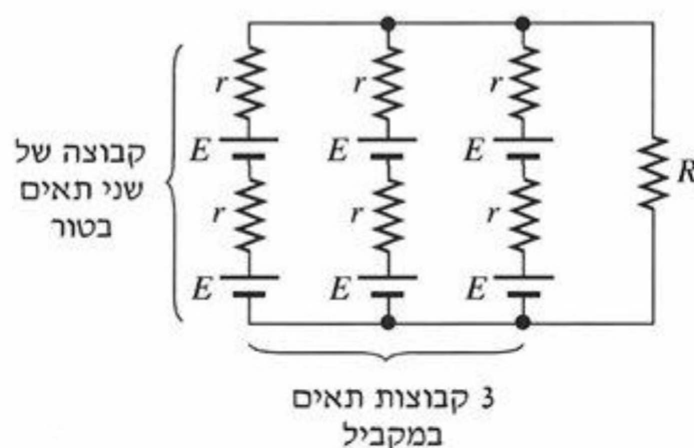
ניתן להוכיח קשר זה בעזרת שיטות לפתרון מעגלים, שיילמדו בהמשך. בינתיים נקבל אפוא תוצאה זו ללא הוכחה.

כשם שההתנגדות השקולה של נגדים, המחוברים במקביל, קטנה מכל אחת מההתנגדויות, כך גם ההתנגדות הפנימית השקולה, של מקורות המחוברים במקביל, קטנה מכל אחת מההתנגדויות הפנימיות של המקורות.

8.8.6 חיבור מעורב של תאים

לפעמים, בגלל דרישות למתח ולהספק מסוימים, יש צורך לחבר תאים בחיבור מעורב. ראינו כבר אפשרויות שונות לחיבור מעורב של נגדים. באופן דומה ניתן לחבר תאים בצורות שונות.

כאן נדון רק במערך של תאים, הכולל קבוצות אחדות של תאים מחוברים בטור, וכל קבוצה מחוברת במקביל לקבוצות נוספות. מערך כזה מתואר באיור 8-85. כל קבוצה במעגל זה – כוללת שני תאים בטור; ויש שלוש קבוצות המחוברות במקביל. גם בחיבור מעורב חייבים כל התאים להיות זהים, בגלל המגבלות שפורטו לגבי חיבור תאים במקביל.



איור 8-85 חיבור מעורב של תאים



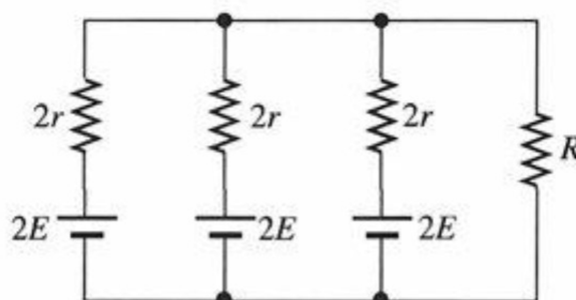
דוגמה 8-24

בטא את הכא״מ השקול ואת ההתנגדות הפנימית השקולה של מערך התאים שבאיור 8-85. הנח כי הכא״מ של כל תא הוא E, וההתנגדות הפנימית – r.

פתרון

נשתמש במשוואות, שפיתחנו לקבלת הגדלים השקולים של הכא״מ וההתנגדות הפנימית, כדי לבטא את הגדלים הנדרשים. נבטא תחילה את הכא״מ השקול E_s ואת ההתנגדות הפנימית השקולה r_s של אחת מקבוצות התאים, המחוברות בטור.

הכא״מ השקול של שני תאים זהים (שהכא״מ של כל אחד מהם הוא E), המחוברים בטור, הוא $E_s = 2E$; וההתנגדות הפנימית השקולה של שני תאים אלה – היא $r_s = 2r$. נוכל אפוא להמיר את מקור המתח, המתואר באיור 8-85, במקור המתח המתואר באיור 8-86.



איור 8-86 מקור מתח שקול למקור המתח שבאיור 8-85

באיור 8-86 נתונים שלושה מקורות מתח, המחוברים במקביל. הכא״מ השקול של תאים אלה – הוא $E_{eq} = 2E$, וההתנגדות הפנימית השקולה היא $r_{eq} = \frac{2}{3}r$. נוכל אפוא להחליף את מערך התאים שבאיור 8-85 – במקור מתח, שהכא״מ שלו הוא $2E$, והתנגדותו הפנימית היא $\frac{2}{3}r$.

זרם I, הזורם בצרכן, שהתנגדותו R ואשר מחובר למערך התאים המתואר באיור 8-86, יהיה אפוא

$$I = \frac{2E}{R + \frac{2}{3}r}$$



נניח כי בחיבור מעורב של תאים זהים – כדוגמת זה שבאיור 8-85 – יש p קבוצות של תאים במקביל, ובכל קבוצה – s תאים בטור. הכא״מ השקול של כל התאים האלה הוא $E_{eq} = sE$, וההתנגדות הפנימית השקולה היא $r_{eq} = \frac{sr}{p}$.

קיבלנו אפוא מעגל טורי, הכולל מקור מתח E_{eq}, שהתנגדותו הפנימית r_{eq}, וצרכן R, ראינו כי התנאי להעברת הספק מְרַבִּי לצרכן במעגל טורי, הוא שהתנגדות הצרכן תהיה שווה להתנגדות הפנימית של מקור המתח, כלומר:

$$R = r_{eq} = \frac{sr}{p}$$

אם התנגדות הצרכן, המחובר למערך תאים בחיבור מעורב, תהיה שווה ל- $\frac{sr}{p}$, יהיה אפוא זרם מְרַבִּי בצרכן.

8.8.7 קיבול שקול של תאים המחוברים בטור, במקביל ובמעורב

קיבול של תא חשמלי

מקור המתח, שאנו עוסקים בו, הוא התא החשמלי, ההופך – כאמור – אנרגיה כימית לאנרגיה חשמלית. האנרגיה הכימית, שהתא מכיל, מוגבלת כמובן. למדנו כבר את הקשר בין אנרגיה להספק: האנרגיה W, הכרוכה בהנעת המטענים במשך הזמן t_0, שווה ל- Pt_0 (כלומר: למכפלת ההספק P במשך הזמן t_0):

$$W = Pt_0$$

אנו מניחים כאן כי הכא״מ קבוע, זרם המעגל קבוע – ואף ההספק קבוע. למדנו שההספק נתון על-ידי מכפלת המתח בזרם, וכן שההספק נתון על-ידי מכפלת הכא״מ E של מקור המתח – בזרם המעגל I:

$$P = EI$$

נציב את ביטוי ההספק P במשוואת האנרגיה W, ונקבל:

$$W = Pt_0 = EIt_0$$

ומכאן:

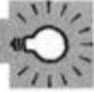
$$\frac{W}{E} = It_0$$

מידיעת הגודל It_0, נוכל לדעת את משך הזמן t_0 , שבו יכול התא לספק לצרכן במעגל – זרם בעל ערך קבוע I. הגודל It_0 נקרא **קיבול התא החשמלי**, והוא נמדד ביחידות אמפר-שעה (A·h). קיבול התא הוא גודל קבוע, האופייני לתא.

לפי הגדרת הזרם, הגודל It_0 הוא מטען. ואכן, הקיבול It_0 של התא, הוא כמות המטען Q, שהתא מעביר במעגל במשך זמן פעולתו t_0, כשהכא״מ של התא קבוע:

$$Q = It_0$$

בנוסף לכא"מ ולהתנגדות הפנימית, קיבול התא הוא אחד ממאפייניו העיקריים של התא החשמלי. יצרני תאים נוהגים, בדרך-כלל, לדרג את התאים החשמליים לפי הקיבול שלהם ב-A·h. ניתן לקבוע את הקיבול של התא – על-ידי פריקתו בזרם קבוע, ומדידת זמן הפריקה. קיבול התא יתקבל אפוא כמכפלת הזרם (באמפרים) בזמן הפריקה (בשעות).



דוגמה 8-25

בטלפון נייד מסוים נמצאת סוללה, שהכא"מ שלה 3.6 V, וקיבולה 1,200 mA·h. נניח כי זרם קבוע של 200 mA זורם בטלפון במשך כל זמן פעולתו.

א. כמה זמן יכול הטלפון הנייד לפעול ברציפות?

ב. מהו ההספק שצורך הטלפון הנייד?

ג. מהי כמות האנרגיה, שהסוללה יכולה לספק במתח קבוע?

ד. מהי כמות המטען, שהסוללה יכולה להעביר במשך פעולתה התקינה?

פתרון

א. לפי הגדרת קיבול התא,

$$t_0 = \frac{Q}{I} = \frac{1,200\ \text{mA}\times\text{h}}{200\ \text{mA}} = 6\ \text{h}$$

המקלט יכול לפעול 6 שעות ברציפות.

ב. כאמור, הספק מקור המתח נתון על-ידי $P = EI$. נציב את הערכים המספריים, ונקבל:

$$P = EI = 3.6\ \text{V} \times 200\ \text{mA} = 3.6\ \text{V} \times 0.2\ \text{A} = 0.72\ \text{W}$$

ג. כאמור, $W = Pt_0$. נציב את הערכים המספריים, ונקבל:

$$W = Pt_0 = 0.72 \times 6\ \text{h} = 0.72 \times 6 \times 3,600 = 15,552\ \text{J}$$

ד. לפי הגדרת קיבול התא, $Q = It_0$. נציב את הערכים המספריים, ונקבל:

$$Q = It_0 = 200\ \text{mA}\ \times\ 6\ \text{h} = 0.2\ \text{A} \times 6 \times 3,600 = \ 4,320\ \text{C}$$

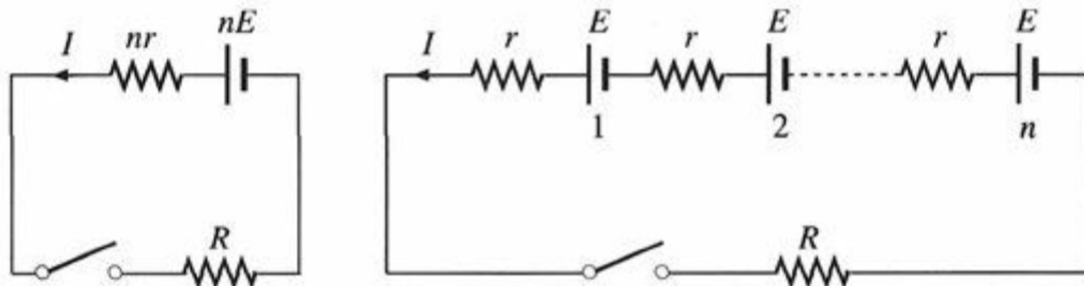


הקיבול השקול של תאים המחוברים בטור

הִכַּרנו שלושה מאפיינים של התא החשמלי: כא״מ, התנגדות פנימית וקיבול. למדנו לחשב את הכא״מ השקול וההתנגדות הפנימית השקולה של מקור מתח, המורכב מִתָּאים, המחוברים בטור. עתה נלמד לחשב את הקיבול השקול של תאים, המחוברים בטור. לשם כך נתבונן במערך של n תאים זהים, המחוברים בטור, ונחשב את הקיבול השקול של מקור זה.

במעגל, המתואר באיור 8-87א, נתונים n תאים זהים, המחוברים בטור. לתאים אלה מחובר צרכן R. המעגל הוא טורי, ולכן אותו זרם I זורם בכל תא. מאחר שהתאים זהים, משך הזמן שזרם I קבוע יזרום בכל תא, הוא זהה, ולכן לכל תא יש אותו קיבול. נסמן על-ידי $Q_1, Q_2, \ldots, Q_n$ את קיבולי התאים, ונקבל:

$$Q_1 = Q_2 = \ldots = Q_n$$



א – תאים זהים מחוברים בטור
ב – מקור מתח שקול לתאים שמימין

איור 8-87 תאים זהים בטור – והשקול שלהם

נחליף את התאים הזהים – במקור מתח שקול, כך שיתקבל המעגל המתואר באיור 8-87ב. הזרם I במעגל זה שווה לזרם במעגל באיור 8-87א. מקור המתח השקול יזרים זרם במשך אותו זמן t_0 – כמו התאים המחוברים בטור. מכאן שהקיבול של מקור המתח השקול הוא It_0. נסיק אפוא כי הקיבול השקול Q של מקור מתח, הבנוי מתאים זהים המחוברים בטור, שווה לקיבול של כל אחד מהתאים המרכיבים אותו. כלומר,

$$Q = Q_1 = Q_2 = \ldots = Q_n$$

נבחר עתה תאים, שקיבוליהם שונים, ונחבר אותם בטור לצרכן. גם במקרה זה יזרום אותו זרם בכל התאים, אך התא, שקיבולו הוא הקטן ביותר, יהיה הראשון שבו תתכלה האנרגיה הדרושה להנעת מטענים מאלקטרודה אחת של התא –לאלקטרודה השנייה.

נסמן על-ידי Q_i את הקיבול הקטן ביותר של אחד מהתאים, המחוברים בטור. הקיבול של תא זה – הוא הקובע אפוא את הקיבול של מערכת התאים המחוברים בטור. מכאן נובע שהקיבול של מקור המתח השקול – שווה לקיבול Q_i.

הקיבול השקול של תאים זהים במקביל

אם נחבר במקביל n תאים בעלי כא״מ זהה וקבוע, כל תא יעביר במעגל מטען, השווה לקיבול התא. המטען הכולל, שכל התאים יעבירו במעגל, יהיה שווה לסכום המטענים, שהתאים מעבירים. נסמן על-ידי $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ את קיבוליהם של n התאים, ונקבל:

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$$

ובניסוח מילולי: הקיבול השקול של תאים, המחוברים במקביל, שווה לסכום קיבוליהם.

השוואה בין קיבול שקול של תאים בטור ובמקביל

למדנו כיצד למצוא את הכא״מ השקול, ההתנגדות הפנימית השקולה והקיבול השקול של מקור מתח, המורכב מְתָאים, המחוברים בטור או במקביל. בטבלה 2-8 מופיעים – במרוכז – הביטויים המתאימים עבור חיבור n תאים זהים, המחוברים בטור או במקביל. הכא״מ של כל תא הוא E; ההתנגדות הפנימית – r , והקיבול – Q.

המאפיין של המקור	הערך בחיבור טורי	הערךבחיבור מקבילי	הערך של תא בודד
כא״מ שקול	nE	E	E
התנגדות פנימית שקולה	nr	$\frac{r}{n}$	r
קיבול שקול	Q	nQ	Q

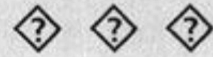
טבלה 2-8 מאפיינים של מקור מתח, המורכב מ-n תאים זהים

מעיון בטבלה 2-8, נוכל לראות מה היתרונות של חיבור תאים במקביל – לעומת חיבור תאים בטור: ההתנגדות הפנימית קטנה יותר, קיבול גדול יותר. אך הדרישה שהתאים המחוברים במקביל יהיו זהים, כדי שהמקור – המורכב מתאים אלה – יוכל לפעול כראוי, מגבילה את מידת השימוש במקור כזה.

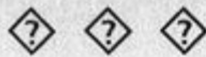
הקיבול השקול של תאים זהים בחיבור מעורב

כאמור, כאן נדון רק במערך של תאים, הכולל קבוצות אחדות של תאים מחוברים בטור, וכל קבוצה מחוברת במקביל לקבוצות נוספות. כדי להדגים את הקיבול השקול של תאים זהים בחיבור מעורב, נחזור ונתבונן במעגל המתואר באיור 8-85.

נסמן על-ידי Q את הקיבול של כל אחד מהתאים במעגל. הקיבול השקול Q_s של שני תאים, המחוברים בטור, הוא $Q_s = Q$; והקיבול השקול של שלושת המקורות, המחוברים במקביל (איור 8-86), הוא $Q_{eq} = 3Q$.



שאלות חזרה



שאלה 8-78

סמן את המלה הנכונה בכל צמד של מלים מודגשות.

צרכן מחובר למקור מתח. מקור המתח מעביר את המטענים החיוביים מפוטנציאל **גבוה/נמוך** לפוטנציאל **גבוה/נמוך** – בתוך התא החשמלי.

שאלה 8-79

1. מהו כא"מ? סמן את כל התשובות הנכונות.
   א. שם אחר למתח הדקים
   ב. קיצור של כוח אלקטרו-מניע
   ג. האנרגיה המושקעת בהנעת יחידת מטען – דרך הצרכן בלבד
   ד. האנרגיה המושקעת בהנעת יחידת מטען – דרך המעגל כולו.
2. האם כא"מ הוא האנרגיה המושקעת בהנעת יחידת מטען – דרך המקור בלבד? נמק.

שאלה 8-80

יחידת הכא"מ היא ...

א. וולט
ב. אמפר
ג. אום
ד. ואט

שאלה 8-81

מהי התנגדות פנימית?

א. התנגדות הצרכן
ב. כל התנגדות הנמצאת במעגל חשמלי
ג. התנגדות המקור למעבר מטענים בו
ד. ההתנגדות השקולה במעגל טורי.

שאלה 8-82

צרכן מחובר בטור למקור מתח. לאיזה מתח שווה המתח על הצרכן?

א. לכא"מ של המקור
ב. למתח ההדקים של המקור
ג. להפרש שבין הכא"מ של המקור, לבין מתח ההדקים של המקור
ד. לסכום של כא"מ המקור ומתח ההדקים של המקור.

שאלה 8-83

נתון כי הכא״מ של מקור המתח במעגל שבאיור 8-75, הוא 9 V. ההתנגדות הפנימית של המקור, היא 0.2 Ω, והתנגדות הצרכן – 16 Ω. חשב את מתח ההדקים של מקור המתח.

שאלה 8-84

צרכן, שהתנגדותו 50 Ω, מחובר למקור מתח, שהתנגדותו הפנימית 0.1 Ω. הזרם בצרכן הוא 239.5 mA. חשב את הכא״מ של מקור המתח.

שאלה 8-85

הכא״מ של מקור מתח – 3 V, וההתנגדות הפנימית – 0.2 Ω. צרכן, שהתנגדותו 16 Ω, מחובר למקור המתח. מה הזרם בצרכן?

שאלה 8-86

באילו מהמקרים הבאים, מתח ההדקים של המקור - שווה לכא״מ?

א. אם שום צרכן אינו מחובר להדקי המקור

ב. אם התנגדות המקור שווה לאפס

ג. אם התנגדות הצרכן שווה לאפס

ד. אם התנגדות המקור שווה להתנגדות הצרכן.

שאלה 8-87

לצעצוע חשמלי מחברים סוללה, המורכבת משישה תאים זהים, המחוברים בטור. כל תא הוא בעל כא״מ של 1.5 V והתנגדות פנימית של 0.1 Ω. התנגדות העומס (הצעצוע) היא 15 Ω.

א. מהו הזרם שהסוללה מספקת?

ב. חשב את ההספק החשמלי, שהצעצוע צורך.

שאלה 8-88

א. נתונים 20 תאים זהים, המחוברים בטור. קיבול כל תא הוא 2A·h. מהו הקיבול השקול של התאים?

ב. הנח שהתאים מחוברים במקביל. מהו עתה הקיבול השקול שלהם?

שאלה 8-89

א. שישה תאים מחוברים במקביל. הכא"מ של כל אחד מהתאים הוא 1.5 V, וההתנגדות הפנימית של כל תא – 0.1 Ω. נגד של 100 Ω מחובר להדקי כל אחד מהתאים, בדומה למתואר באיור 8-84א. מהו הזרם בנגד?

ב. חיברו שוב את התאים ואת הצרכן, והפעם כולם בטור. מהו עתה הזרם בנגד?

שאלה 8-90

הראה כי הזרם בצרכן R שבציור 8-87 – נתון על-ידי המשוואה $I=\dfrac{2E}{R+\frac{2}{3}r}$ שבסוף דוגמה 8-24.

שאלה 8-91

חמש סוללות זהות מחוברות במקביל. כל סוללה כוללת שלושה תאים זהים, המחוברים בטור. הכא"מ של כל תא הוא 1.5 V, וההתנגדות הפנימית – 0.2 Ω.
חשב את הכא"מ השקול ואת ההתנגדות הפנימית השקולה של הסוללות.

סיכום פרק 8

- כאשר נגדים, הנמצאים באותו חוג, מחוברים זה לזה, קצה לקצה, כמו בשרשרת – ואין צמתים ביניהם – הנגדים מחוברים בטור. מעגל, שבו כל הנגדים מחוברים בטור, נקרא מעגל טורי.

- התנגדות שקולה במעגל היא התנגדות, שכאשר היא מחוברת במקום מערכת נגדים כלשהי במעגל, היא אינה משנה את תנאי המעגל. זרם המקור אינו משתנה; והמתח בין הנקודות – שאליהן מחוברת ההתנגדות השקולה – נשאר אותו מתח.

- ההתנגדות השקולה של שני נגדים, המחוברים בטור, שווה לסכום ההתנגדויות של הנגדים. כאשר נגדים מחוברים בטור, היחס בין המתחים על הנגדים – שווה ליחס בין התנגדויות הנגדים.

- התנגדות התֵילִים במעגל החשמלי – נקראת התנגדות הקו.

- נגדים, המחוברים בין אותם שני צמתים במעגל, מחוברים במקביל. מעגל חשמלי, שבו כל הנגדים מחוברים במקביל, נקרא מעגל מקבילי.

- ההתנגדות השקולה R_{eq} של שני נגדים, המחוברים במקביל, נתונה על-ידי כל אחת משתי המשוואות הבאות:

$$R_{eq}=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2} \qquad \frac{1}{R_{eq}}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}$$

- ההתנגדות השקולה R_{eq} של n נגדים, המחוברים במקביל:

$$\frac{1}{R_{eq}}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\ldots+\frac{1}{R_n}$$


עמ' 277

- כשצרכנים מחוברים במקביל לרשת, ניתן לחבר צרכן נוסף לרשת – או לנתק צרכן – בלי להשפיע על יתר הצרכנים.

- במעגל מעורב מחוברים חלק מן הנגדים במקביל, וחלק – מחוברים בטור.

- מחלק מתח הוא הֶתקן, המאפשר לקבל מתח מוצא, שהוא רק חלק ממתח המקור. יש מחלק מתח, הבנוי משני נגדים קבועים.

- הפוטנציומטר והריאוסטט הם שני סוגים של נגדים משתנים.

- סכום הספקי הצרכנים במעגל מעורב – שווה להספק המקור.

- הנצילות היא היחס בין ההספק המופק-המועיל להספק המושקע.

- התנאי להעברת הספק מרבי לצרכן במעגל טורי, הכולל מקור מתח ממשי וצרכן, הוא שהתנגדות הצרכן תהיה שווה להתנגדות המקור.
- האנרגיה, שמקור מתח צריך להשקיע בהנעת יחידת מטען סביב המעגל החשמלי כולו, היא הכא״מ של מקור המתח. למקור המתח יש התנגדות פנימית. המתח שבין הדקי המקור – הוא מתח ההדקים של המקור.
- קיבול של תא חשמלי הוא משך הזמן, שבו התא יכול לספק לצרכן במעגל – זרם בעל ערך קבוע.
- הנה המאפיינים של מקור מתח, המורכב מ- n תאים זהים:

המאפיין של המקור	הערך בחיבור טורי	הערךבחיבור מקבילי	הערך של תא בודד
כא״מ שקול	nE	E	E
התנגדות פנימית שקולה	nr	$\frac{r}{n}$	r
קיבול שקול	Q	nQ	Q

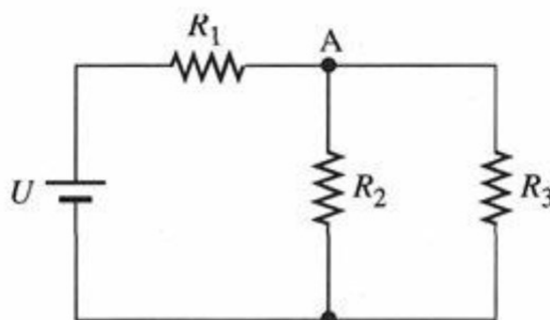
9

שיטות לפתרון מעגלים

עד כה למדנו לפתור מעגלים טוריים, מקביליים או מעורבים, כאשר כל מעגל הכיל מקור מתח יחיד. לצורך הפתרון, חישבנו את ההתנגדות השקולה של הנגדים במעגל, ובאמצעות חוק אום מצאנו את הזרמים והמתחים השונים במעגל.

האם די בחוק אום ובחישוב ההתנגדות השקולה, כדי לפתור כל מעגל חשמלי?

כדי לענות על שאלה זו, נתבונן תחילה במעגל, המכיל מקור מתח יחיד, כמתואר באיור 9-1. זהו מעגל מעורב, שבו הנגד R_1 מחובר בטור לצירוף של הנגדים R_2 ו-R_3, המחוברים במקביל.

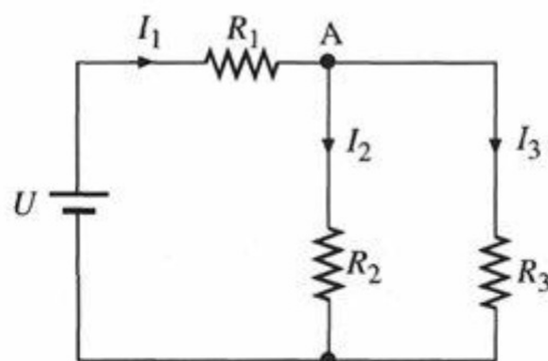


איור 9-1 מעגל בעל מקור מתח יחיד

באיור 9-2 נתון שוב המעגל שבאיור 9-1, ומסומנים בו הזרמים במעגל. כאמור, השתמשנו בכלל הבא לסימון כיווני הזרמים:

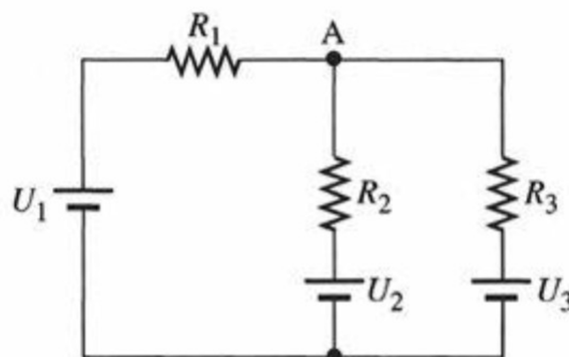
> הזרם המוסכם בנגד – זורם מנקודה בעלת פוטנציאל גבוה לנקודה בעלת פוטנציאל נמוך.

אם-כן, הזרם הכללי I_1 במעגל – יוצא מההדק החיובי של מקור המתח, עובר בנגד R_1, מגיע לצומת A, ומתפצל לזרמים I_2 ו-I_3 בנגדים R_2 ו-R_3. כל כיווני הזרמים במעגל שבאיור 9-2 – מסומנים בהתאם לכלל סימון כיווני הזרמים.



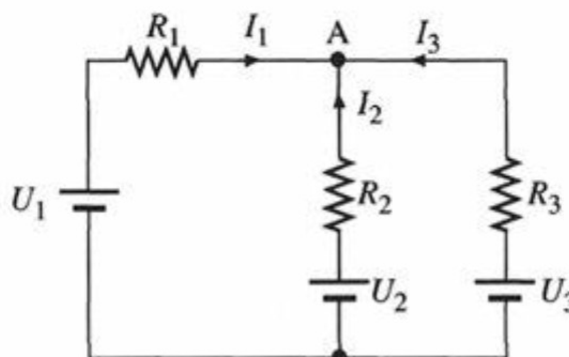
איור 9-2 כיווני הזרמים במעגל בעל מקור מתח יחיד

עכשיו נוסיף למעגל שבאיור 9-1 – שני מקורות מתח, ונקבל את המעגל שבאיור 9-3.



איור 9-3 מעגל בעל שלושה מקורות מתח

נניח שכל מקור מתח מזרים זרם, שכיוונו מההדק החיובי של המקור – אל הנגד הסמוך לו, וכיווני הזרמים הם כמתואר באיור 9-4. נראה מיד שהדבר לא ייתכן. כי הרי במקרה כזה, לצומת A היו נכנסים שלושה זרמים, I_1, I_2 ו-I_3, ואף זרם לא היה יוצא ממנו. דבר זה עומד בסתירה לחוק הזרמים של קירכהוף, שלפיו סכום הזרמים, הנכנסים לצומת, שווה לסכום הזרמים היוצאים מהצומת.



איור 9-4 סימון כיווני הזרמים במעגל בעל שלושה מקורות מתח
(סימון זה סותר את חוק הזרמים של קירכהוף)

המסקנה היא, שלפחות כיוונו של אחד הזרמים חייב להיות הפוך לכיוון המסומן באיור 9-4. אבל כיוונו של איזה זרם מבין השלושה הוא הפוך? ייתכן גם שכיווניהם של שניים מבין הזרמים I_1, I_2, I_3 הפוכים מהמסומן באיור 9-4. ואם כך הדבר – אילו מהם?

לא די בחוק אום ובחישוב התנגדויות שקולות, כדי לענות על השאלות האלה, ולמצוא פתרון למעגלים, כדוגמת המעגל שבאיור 9-3. אבל קיימות שיטות, שבעזרתן אפשר לפתור מעגלים כאלה, ואף מעגלים מורכבים יותר. כל השיטות הללו מבוססות על שימוש בחוק אום ובחוקי קירכהוף. נלמד עתה את אחת השיטות הללו.

9.1 שיטת זרמי החוגים

שיטת זרמי החוגים לפתרון מעגלים חשמליים פותחה על-ידי הפיזיקאי הבריטי מאקסוול.

ג'יימס קלארק מאקסוול

1879-1831



מאקסוול היה פיזיקאי בריטי. הוא נולד באדינבורו שבסקוטלנד. כבר בגיל 14 כתב את המאמר המדעי הראשון שלו, והמאמר הוקרא בפני החברה המלכותית של אדינבורו. בתקופה זו גם החל בכתיבת שירה, והמשיך בכך עד סוף ימיו.

מאקסוול נחשב לאחד הפיזיקאים הגדולים בכל הדורות. מבין הפיזיקאים שחיו במאה ה-19, הוא היה בעל ההשפעה הגדולה ביותר על הפיסיקה המודרנית של המאה ה-20. רבים מהפיזיקאים בימינו רואים בו פיזיקאי מדרגתם של ניוטון ואיינשטיין. איינשטיין תיאר את עבודתו של מאקסוול כעבודה המעמיקה ביותר והפורייה ביותר בפיסיקה מאז ניוטון.

מאקסוול איחד את תורת החשמל ואת תורת המגנטיות לתורה אחת – התורה האלקטרומגנטית, וניסח אותה באמצעות ארבע משוואות בלבד, הנקראות על שמו. משוואות אלה הן הבסיס המתמטי לכל התופעות החשמליות הקלאסיות.

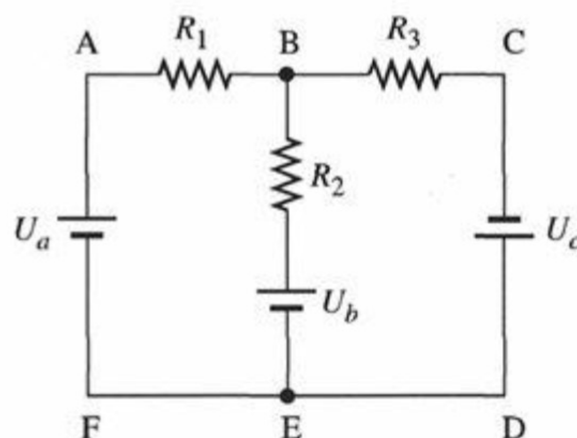
אנו נפתור בשיטת זרמי החוגים את המעגל שבאיור 5-9א. אך תחילה נסביר את המושג **זרם חוג**. לשם כך נחזור ונסביר מה הם הזרמים שעסקנו בהם עד כה. כאמור, בכל קטע במעגל, המורכב מקבוצת רכיבים המחוברים בטור, זורם אותו זרם. לקבוצת רכיבים כזאת, קוראים **ענף**; ולזרם כזה קוראים **זרם ענף**. אם נחבר מד זרם בטור לענף מסוים, ימדוד מד הזרם את זרם הענף. בעיקרון, זרם ענף – הזורם בענף אחד – יכול להיות שונה מזרם ענף, הזורם בענף אחר.

בפרקים הקודמים עסקנו, למעשה, בזרמי ענפים (הן במעגלים טוריים והן במעגלים מעורבים), בלי שקראנו להם בשם זה. נתבונן, למשל, במעגל שבאיור 5-9א. זרמי הענפים במעגל זה הם הזרמים שבענפים הבאים:

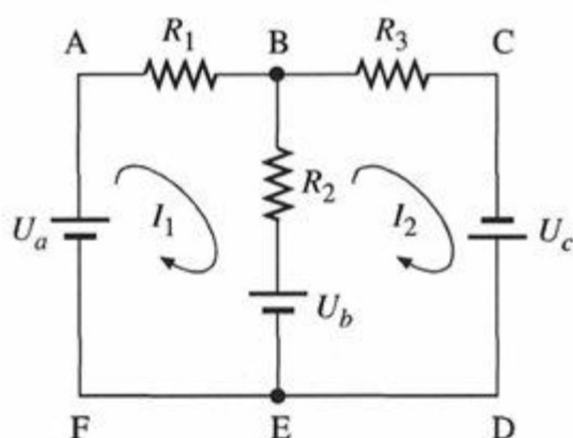
BAF (מקור המתח U_a והנגד R_1)

BE (מקור המתח U_b והנגד R_2)

BCD (מקור המתח U_c והנגד R_3)



א – מעגל בעל שני חוגים



ב – סימון זרמי חוגים במעגל

איור 5-9

אם-כן, במעגל שבאיור 5-9א, יש שלושה ענפים, ויש בו שלושה זרמי ענפים שונים.

זרמי חוגים

בניגוד לזרם ענף, **זרם חוג** מוגדר כזרם הזורם בחוג כולו. כאמור, חוג אחד יכול להכיל כמה ענפים, המחוברים זה לזה בחיבור שאינו בהכרח טורי. אם-כן, זרם חוג הוא זרם אחד, הזורם בכל ענפי החוג השונים. נסביר עתה את הקשר בין שני סוגי זרמים אלה: זרם חוג וזרם ענף.

נתבונן בשני החוגים, ABEFA ו-BCDEB, אשר במעגל שבאיור 5-9א. נסתכל על כל חוג בנפרד, ונשייך זרם אחד לחוג כולו. לחוג ABEFA נשייך את זרם החוג I_1, ולחוג BCDEB נשייך את זרם החוג I_2, כמתואר באיור 5-9ב.

כאמור, אותו זרם חוג יכול לזרום בכמה ענפים שונים. למשל: בחוג ABEFA, המורכב משני ענפים (הענף BAF, המכיל את U_a ו-R_1; והענף BE, המכיל את U_b ו-R_2), זורם אותו זרם חוג I_1. וכך הדבר לגבי החוג BCDEB, המורכב מהענפים BCD ו-BE. בכל החוג הזה זורם אותו זרם חוג I_2.

אנו רואים כי בענף BE, המכיל את U_b ו-R_2, זורמים **שני** זרמי חוגים: I_1 ו-I_2; והרי אם נחבר בענף זה מד זרם, הוא ימדוד רק זרם **אחד** – זרם הענף. אם-כן, מהו הקשר בין הזרם בענף BE לבין שני זרמי החוגים I_1 ו-I_2 הזורמים בענף זה?

ובכן, זרם הענף הוא הזרם **השקול** של שני זרמי החוגים. נסביר זאת. אנו רואים כי במעגל שבאיור 5-9ב, זרם החוג I_1 בענף BE – הפוך בכיוונו לזרם החוג I_2 בענף זה. לכן זרם הענף שווה להפרש בין שני זרמי החוגים הללו (להלן נדון בתנאי לכך, שההפרש יהיה $I_1–I_2$ או $I_2–I_1$). הפרש זרמים זה הוא הזרם השקול של שני זרמי חוגים אלה, הזורמים בענף BE, וכיוונו ככיוון הזרם הגדול בין שניהם.

הכיוונים של זרמי החוגים, I_1 ו-I_2, סומנו באיור 5-9ב בכיוון תנועת מחוגי השעון. כך מסמנים לעתים קרובות את כיוון זרמי החוגים, אך לא תמיד.

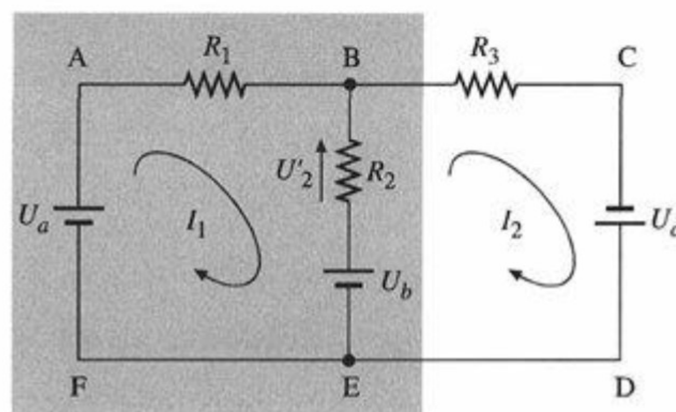
סימון מתחים בענף שיש בו שני זרמי חוגים

חשוב להבין כי זרמי החוגים הם זרמים "מלאכותיים", שאנו מכניסים, כדי שנוכל לפתור מעגלים בצורה קלה יותר. אך הזרמים הממשיים במעגל - הם זרמי הענפים. בענף שזורם בו רק זרם חוג אחד, זרם החוג שווה לזרם הענף: כך הדבר לגבי הענף BAF שבאיור 5-9ב (זרם הענף שווה לזרם החוג I_1), וכך הדבר לגבי הענף BCD (זרם הענף שווה לזרם החוג I_2). בענף, שזורם בו יותר מזרם חוג אחד, זרם הענף הוא **השקול** של זרמי החוגים האלה.

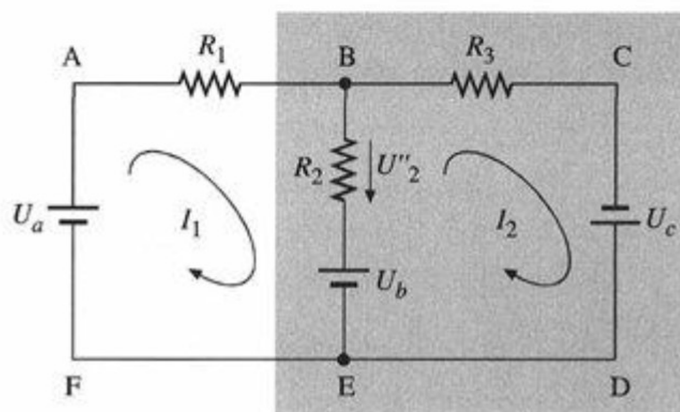
וכיצד מחשבים בשיטת זרמי החוגים את המתח על ענף, המשותף לשני חוגים?

נתבונן בנפרד בחוג ABEFA ובחוג BCDEB של המעגל שבאיור 5-9ב. תחילה נתבונן בחוג השמאלי, שבו זורם זרם החוג I_1. חוג זה מודגש באיור 6-9א. מפל המתח U_2' על הנגד R_2,

שזורם בו זרם החוג I_1, הוא $U'_2 = I_1R_2$. החץ המצביע על מקום הפוטנציאל הגבוה ברכיב, מסומן באיור זה – בהתאם להסכמנו – בכיוון הפוך לזרם החוג I_1.



א – הדגשת החוג השמאלי של המעגל שבאיור 9-5ב

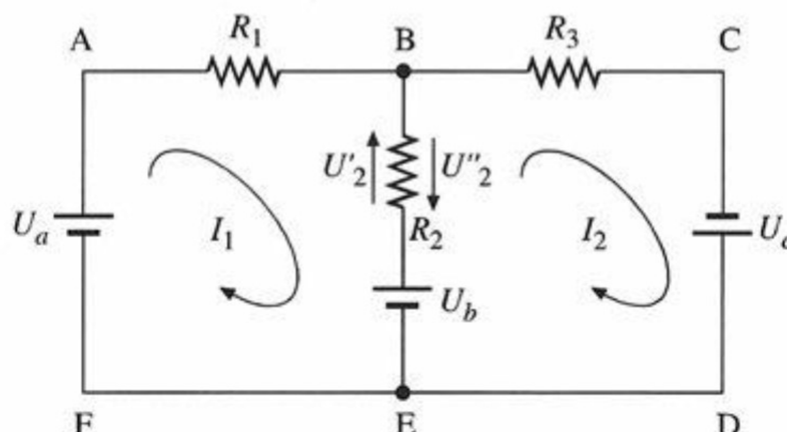


ב – הדגשת החוג הימני של המעגל שבאיור 9-5ב

איור 9-6

החוג הימני של המעגל שבאיור 9-5ב מודגש באיור 9-6ב. בחוג זה זורם זרם החוג I_2. מפל המתח U''_2 על הנגד R_2, שזורם בו זרם החוג I_2, הוא $U''_2 = I_2R_2$. גם במקרה זה סומן החץ ליד הרכיב – לפי ההסכם שקבענו.

אם-כן, אנו אומרים כי בשיטת זרמי החוגים, עוברים בנגד R_2 שני זרמים, ויש עליו שני מתחים: U'_2 ו- U''_2. באיור 9-7 נתון שוב המעגל שבאיור 9-5ב, ומסומנים בו שני המתחים U'_2 ו-U''_2 והחִצים המתאימים להם.



איור 9-7 מפלי המתח על הנגד R_2 וכיווניהם

המתח U_2, שמד מתח ימדוד על הנגד R_2, שווה להפרש בין שני המתחים U_2' ו- U_2'' :

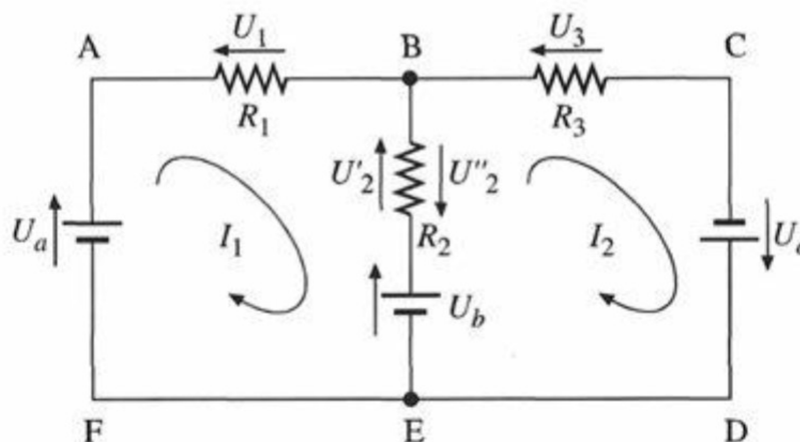
$$U_2 = U_2' - U_2''$$

קוטביות המתח U_2 זהה לקוטביות המתח הגדול מבין שני המתחים : U_2' ו- U_2''.

עתה, לאחר שהסברנו את המושגים הבסיסיים בשיטת זרמי החוגים, נוכל להדגים פתרון מעגל בשיטה זו.

פתרון מעגל בשיטת זרמי החוגים

אנו רוצים לפתור בשיטת זרמי החוגים את המעגל שבאיור 9-7. את השלבים הראשונים בפתרון המעגל כבר עשינו : חילקנו את המעגל לשני חוגים, ABEFA ו-BCDEB ; שייכנו לכל חוג – זרם חוג משלו, וקבענו כיוון מסוים לכל זרם חוג. כן סימנו את המתחים U_2' ו- U_2'' על הנגד R_2. עתה נסרטט חץ ליד כל אחד מהרכיבים במעגל, על-פי הכללים שקבענו. סרטוט זה מתואר באיור 9-8.



איור 9-8 סימון מתחים על הרכיבים במעגל

עכשיו נשתמש בחוק המתחים של קירכהוף לגבי כל אחד מהחוגים במעגל. נקיף כל חוג בכיוון זרם החוג המתאים, ונקבל :

משוואת המתחים בחוג השמאלי (ABEFA) :

$$U_a \underbrace{- U_1 + U'_2}_{\text{המתח על הנגד } R_2} - U_b = 0$$

ומשוואת המתחים בחוג הימני (BCDEB):

$$U_b \underbrace{+U'_2 - U''_2}_{R_2 \text{ המתח על הנגד}} - U_3 + U_c = 0$$

נשתמש בחוק אום, כדי לבטא את המתחים על הנגדים – באמצעות הזרמים I_1 ו-I_2.

$$U_1 = R_1 I_1 \qquad U'_2 = R_2 I_1$$

$$U_3 = R_3 I_2 \qquad U''_2 = R_2 I_2$$

נציב ביטויים אלה במשוואות המתחים שרשמנו, ונקבל:

$$U_a - R_1 I_1 - R_2 I_1 + R_2 I_2 - U_b = 0$$

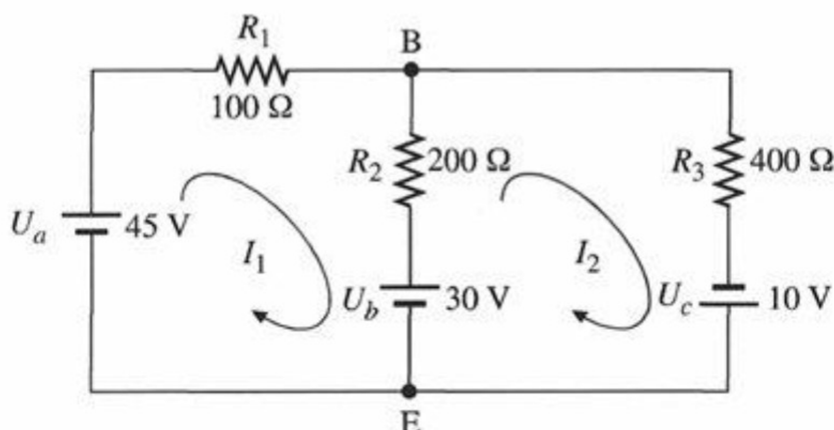
$$U_b + R_2 I_1 - R_2 I_2 - R_3 I_2 + U_c = 0$$

נכנס איברים (כלומר, נוציא את I_1 ואת I_2 מחוץ לסוגריים, בכל אחת מהמשוואות), נרכז את המתחים באגף אחד, ואת הזרמים וההתנגדויות - באגף השני. אם-כן, נקבל כי

$$(R_1 + R_2)I_1 - R_2 I_2 = U_a - U_b$$

$$-R_2 I_1 + (R_2 + R_3)I_2 = U_b + U_c$$

קיבלנו שתי משוואות בשני נעלמים, I_1 ו-I_2. (אנו מניחים שערכי הנגדים ומקורות המתח במעגל ידועים לנו). אם נפתור את המשוואות האלה, נדע את הזרם בכל נגד במעגל. באיור 9-9 נתון המעגל שבאיור 9-5, כאשר רשומים בו ערכי הרכיבים במעגל.



איור 9-9 ערכי הרכיבים במעגל שבאיור 9-5

נציב את ערכי הרכיבים בשתי המשוואות שקיבלנו:

$$(100 + 200)I_1 - 200I_2 = 45 - 30$$
$$-200I_1 + (200 + 400)I_2 = 30 + 10$$

נכנס איברים, ונקבל:

$$300I_1 - 200I_2 = 15$$
$$-200I_1 + 600I_2 = 40$$

קיבלנו שתי משוואות פשוטות למדי בשני הנעלמים I_1 ו-I_2. נפתור אותן ונקבל:

$$I_1 = 0.121 \text{ A} = 121 \text{ mA}$$
$$I_2 = 0.107 \text{ A} = 107 \text{ mA}$$

הכיוונים של זרמי החוגים, I_1 ו-I_2, נקבעו בהתאם לבחירתנו. אבל יכולנו לבחור את כל אחד מהכיוונים של זרמי החוגים – גם בכיוון הפוך לכיוון המסומן.

איך נדע אם בחירת הכיוונים של זרמי החוגים – נכונה?

נוכל לדעת זאת, רק לאחר שנחשב את זרמי החוגים. כאשר מתקבל ערך חיובי של זרם, פירוש הדבר שכיוון הזרם במעגל – הוא אכן אותו כיוון שבחרנו מלכתחילה; ואילו כאשר מתקבל ערך שלילי של זרם, פירוש הדבר שכיוון הזרם במעגל – **הפוך לכיוון** שבחרנו מלכתחילה.

מה נוכל להסיק מהפתרונות שקיבלנו?

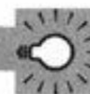
- הזרם בנגד $R_1 = 100\ \Omega$ הוא $I_1 = 0.121$ A. לזרם I_1 יש ערך חיובי, לכן הכיוון של זרם זה – הוא כמתואר במעגל שבאיור 9-9.

- הזרם בנגד $R_3 = 400\ \Omega$ הוא $I_2 = 0.107$ A. גם לזרם I_2 יש ערך חיובי, לכן גם הכיוון של זרם זה – הוא כמתואר במעגל שבאיור 9-9.

- הזרם בנגד $R_2 = 200\ \Omega$ הוא ההפרש בין הזרמים I_1 ו-I_2. כיוון הזרם בנגד זה הוא ככיוון הזרם הגדול מבין השניים. מאחר שהזרם I_1 גדול מהזרם I_2, כיוון הזרם בנגד R_2 הוא ככיוון הזרם I_1 (כלומר, מהנקודה B לנקודה E). ערך הזרם בנגד זה הוא

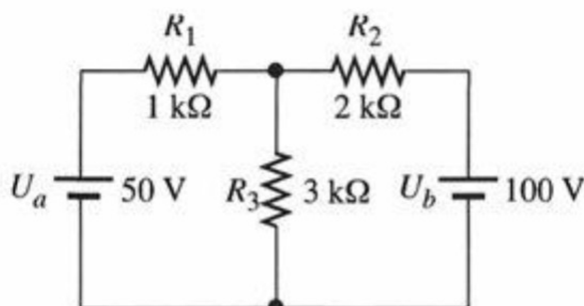
$$I_1 - I_2 = 0.121 - 0.107 = 0.014 \text{ A} = 14 \text{ mA}$$

לאחר שחישבנו את הזרם בכל ענף במעגל, נוכל לחשב את המתח על כל אחד מהנגדים במעגל, וכן נוכל לחשב את ההספק של כל נגד. בכך נסיים את פתרון המעגל.



דוגמה 9-1

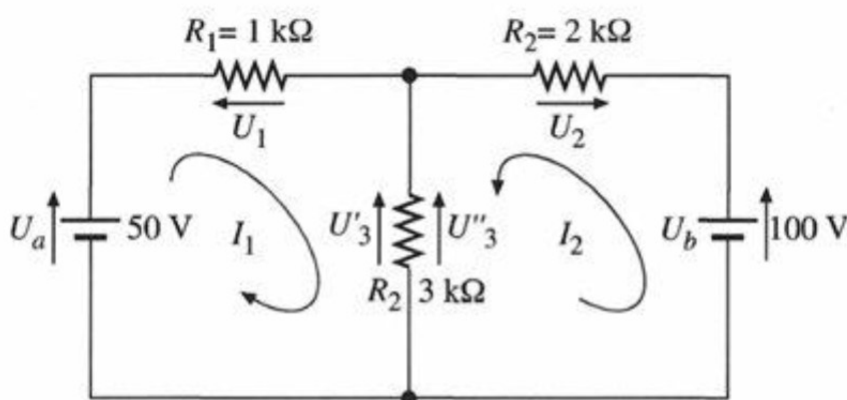
חשב את הספק הנגד R_3, אשר במעגל שבאיור 9-10.



איור 9-10

פתרון

באיור 9-11 מסומנים החִצים ליד רכיבי המעגל, בהתאם להסכמנו. כיוון זרמי החוגים נקבע כרצוננו.



איור 9-11

נקיף כל חוג בכיוון זרם החוג המתאים, ונשתמש בחוק המתחים של קירכהוף, כדי לרשום את משוואות המתחים בחוגים. המשוואות הן

$$U_a - U_1 - U_3' - U_3'' = 0$$ (החוג השמאלי)

$$U_b - U_2 - U_3' - U_3'' = 0$$ (החוג הימני)

לפי חוק אום נקבל כי

$$U_1 = R_1 I_1 \qquad U_2 = R_2 I_2$$

$$U_3' = R_3 I_1 \qquad U_3'' = R_3 I_2$$

נציב במשוואות החוגים את הביטויים המתאימים של המתחים, ונקבל:

$$U_a - R_1 I_1 - R_3 I_1 - R_3 I_2 = 0$$

$$U_b - R_2 I_2 - R_3 I_1 - R_3 I_2 = 0$$

נכנס איברים, ונרכז את המתחים באגף אחד, ואת הזרמים וההתנגדויות – באגף השני:

$$(R_1 + R_3)I_1 + R_3 I_2 = U_a$$

$$R_3 I_1 + (R_2 + R_3)I_2 = U_b$$

נציב את הנתונים, ונקבל:

$$4{,}000 I_1 + 3{,}000 I_2 = 50$$

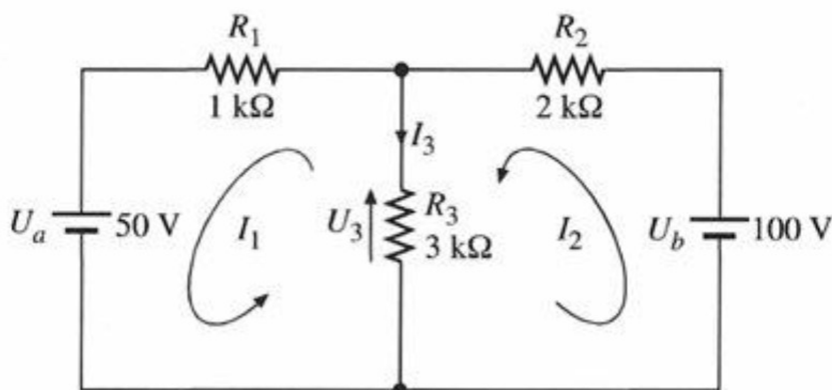
$$3{,}000 I_1 + 5{,}000 I_2 = 100$$

קיבלנו שתי משוואות בשני הנעלמים I_1 ו-I_2. פתרונות המשוואות הם:

$$I_1 = -4.54 \text{ mA}$$

$$I_2 = 22.72 \text{ mA}$$

לזרם I_1 יש ערך שלילי, לכן הכיוון של זרם זה הפוך לכיוון המתואר במעגל שבאיור 9-11. ואילו לזרם I_2 יש ערך חיובי, לכן כיוון זרם זה הוא כמתואר באיור. במעגל שבאיור 9-12 מסומנים כיווני הזרמים כך, שלכל אחד מהם יש ערך חיובי.



איור 9-12

כיוון הזרם I_1 בנגד $R_3 = 3\ \text{k}\Omega$ (איור 9-12), הפוך לכיוון הזרם I_2 בנגד זה. מאחר שהזרם I_2 גדול מהזרם I_1, הרי שכיוון הזרם I_3 בנגד R_3 – הוא ככיוון הזרם I_2. ערך הזרם בנגד זה הוא

$$I_3 = I_2 - I_1 = 22.72 - 4.54 = 18.18\ \text{mA}$$

חץ הזרם I_3 מסומן במעגל שבאיור 9-12. המתח U_3 והחץ שלידו מסומנים גם הם. כיווני החצים נקבעו לפי הסכם הסימונים של זרם ומתח בנגד. הספק הנגד R_3 נתון על-ידי

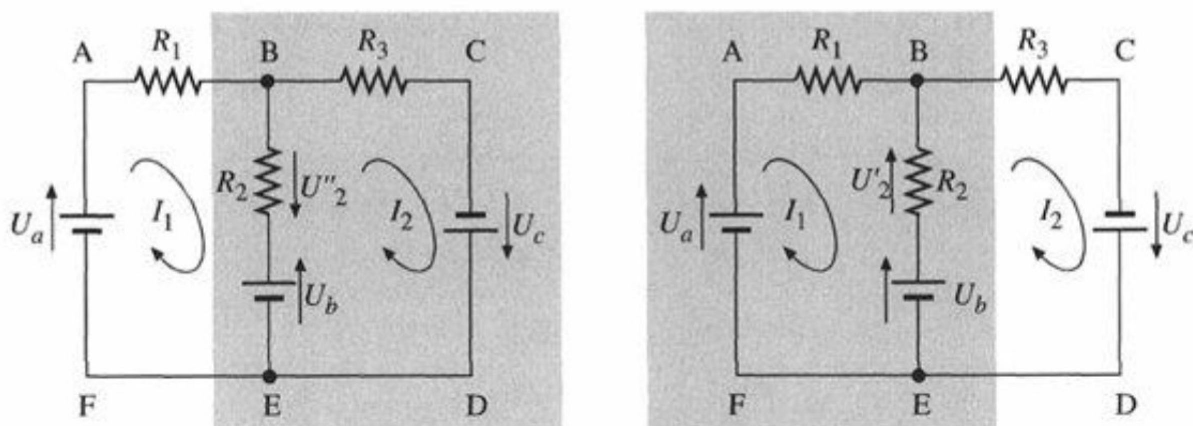
$$P_3 = I_3^{\,2} R_3 = \left(\frac{18.18}{1{,}000}\right)^2 \times 3{,}000 = 0.99\ \text{W}$$



קבלה מִידית של המשוואות בשיטת זרמי החוגים

למדנו לכתוב את משוואות המתחים בכל אחד מהחוגים של מעגל נתון. לאחר שפותרים משוואות אלה, מקבלים את הערכים של זרמי החוגים, ובאמצעותם - ניתן לחשב את הזרם בכל רכיב במעגל, ואת המתח על כל רכיב.

התהליך של קבלת משוואות המתחים – כלל כמה וכמה שלבים. ניווכח עכשיו כיצד ניתן לקבל באופן מִיָּדִי את המשוואות. לשם כך נחזור ונרשום את משוואות המתחים בחוגי המעגל שבאיור 9-6. מטעמי נוחות חזרנו והבאנו באיור 9-13 – איור זה.



איור 9-13

משוואת המתחים בחוג ABEFA, שבו זורם זרם החוג I_1 (המשוואה הראשונה):

$$(R_1 + R_2)I_1 - R_2I_2 = U_a - U_b$$

משוואת המתחים בחוג BCDEB, שבו זורם זרם החוג I_2 (המשוואה השנייה):

$$-R_2I_1 + (R_2 + R_3)I_2 = U_b + U_c$$

נתחיל במשוואה הראשונה. אגף ימין של המשוואה – הוא סכום מתחי המקורות בחוג ABEFA. הסימן ליד כל אחד ממתחי המקורות במשוואה זו, נקבע לפי הכלל שלמדנו בסעיף 7.3.

כיוון החץ ליד מקור המתח U_a הוא ככיוון זרם החוג I_1, ולכן רושמים משמאל ל-U_a את הסימן "+" (או שלא רושמים שום סימן); וכיוון החץ ליד מקור המתח של U_b, הפוך לכיוון של זרם החוג I_1, ולכן רשום משמאל ל-U_b הסימן "–".

אגף שמאל של המשוואה הראשונה – הוא סכום מפלי המתח בחוג ABEFA. סכום זה מבוטא באמצעות מכפלות של התנגדויות – בזרמי החוגים. נפרט זאת.

- מכפילים את סכום ההתנגדויות של החוג – בזרם החוג. סכום ההתנגדויות של החוג ABEFA, הוא $R_1 + R_2$. זרם החוג ABEFA הוא I_1, והמכפלה שלהם היא $(R_1 + R_2)I_1$. מכפלה זו מופיעה במשוואה הראשונה.
- אם בחוג יש נגד, המשותף לחוג נוסף, מכפילים כל התנגדות משותפת - בזרם החוג של החוג הנוסף. הנגד R_2 משותף לחוג ABEFA ולחוג הנוסף BCDEB. זרם החוג הנוסף, הזורם בנגד זה, הוא I_2. לכן מופיעה במשוואה הראשונה המכפלה R_2I_2.
- משמאל למכפלה הראשונה (מכפלת סכום ההתנגדויות בזרם החוג) רושמים את הסימן "+" (או שלא רושמים שום סימן).
- אם לשני זרמי החוגים, יש אותו כיוון בנגד המשותף, רושמים את הסימן "+" משמאל למכפלה השנייה (מכפלת ההתנגדות המשותפת – בזרם החוג הנוסף). ואם לשני זרמי החוגים, יש כיוונים הפוכים בנגד המשותף, רושמים את הסימן "–" משמאל למכפלה זו.

באופן דומה מקבלים במשוואה השנייה את הביטויים המתאימים לחוג BCDEB. כיווני החִצים ליד מקורות המתח U_b ו-U_c הם ככיוון זרם החוג I_2, ולכן מופיעים מתחים אלה בקוטביות חיובית – באגף ימין של המשוואה.

באגף שמאל של המשוואה השנייה, מופיעה המכפלה של זרם החוג I_2 בסכום ההתנגדויות של החוג: $(R_2 + R_3)I_2$. משמאל למכפלה זו, מופיע הסימן "+".

הנגד R_2 משותף לחוג BCDEB ולחוג הנוסף ABEFA, וזורם בו זרם החוג הנוסף I_1. לכן מופיעה במשוואה השנייה המכפלה R_2I_1. הואיל ולשני זרמי החוגים, יש כיוונים הפוכים בנגד המשותף, רושמים את הסימן "–" משמאל למכפלה זו.

בגישה, שבה השתמשנו לקבלה מִיָדית של המשוואות בשיטת זרמי החוגים, ניתן להשתמש לגבי כל מעגל חשמלי, ולא רק לגבי המעגל שבאיור 5-9ב. בדוגמה הבאה נשתמש בגישה זו – לגבי מעגל נוסף.



דוגמה 9-2

רשום באופן מִיָדי את משוואות המתחים של המעגל שבאיור 9-11.

פתרון

סכום המתחים בחוג השמאלי, הוא U_a; וסכום ההתנגדויות בחוג זה, הוא $R_1 + R_3$. מכפלת סכום ההתנגדויות של החוג – בזרם החוג, היא $(R_1 + R_3)I_1$. הנגד R_3 משותף לחוג השמאלי ולחוג הימני. זרם החוג הנוסף, הזורם בנגד זה, הוא I_2. לכן מופיעה במשוואה הראשונה המכפלה R_3I_2.

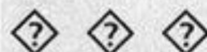
כיוון זרם החוג I_2 בנגד המשותף, הוא ככיוון זרם החוג I_1, ולכן יופיע הסימן "+" משמאל למכפלה R_3I_2. מכאן שמשוואת המתחים של החוג השמאלי היא

$$(R_1 + R_3)I_1 + R_3I_2 = U_a$$

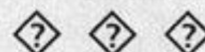
סכום המתחים בחוג הימני, הוא U_b; וסכום ההתנגדויות בחוג זה – $R_2 + R_3$. כאמור, לשני זרמי החוגים יש אותו כיוון בנגד המשותף R_3, ולכן יופיע הסימן "+" משמאל למכפלה R_3I_1. אם-כן, משוואת המתחים של החוג השמאלי היא

$$R_3I_1 + (R_2 + R_3)I_2 = U_b$$



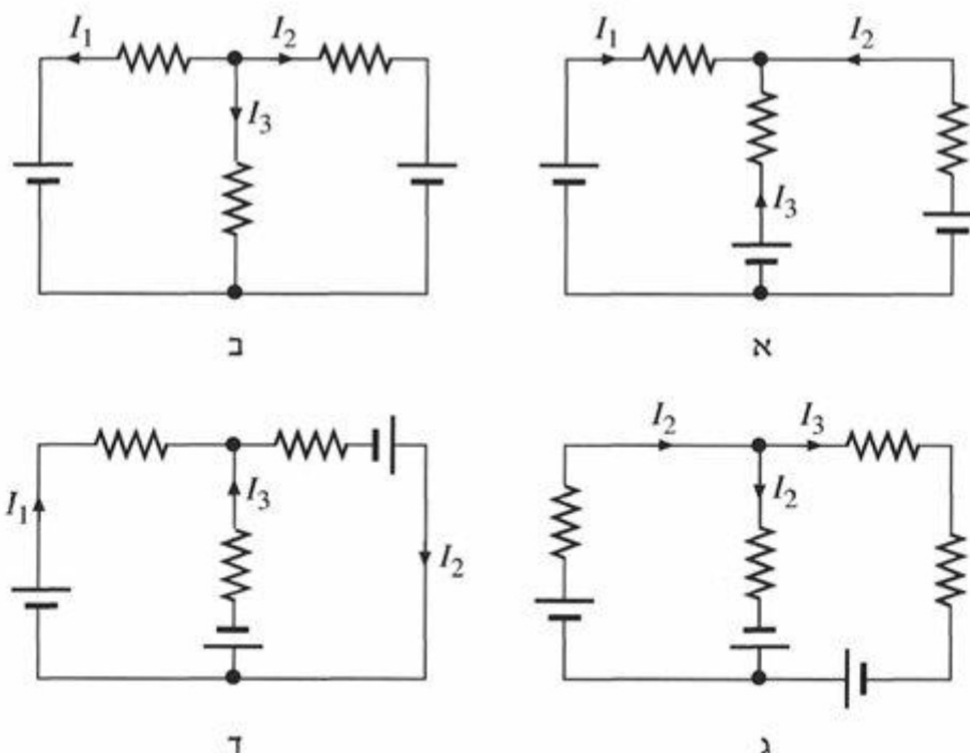


שאלות חזרה



שאלה 9-1

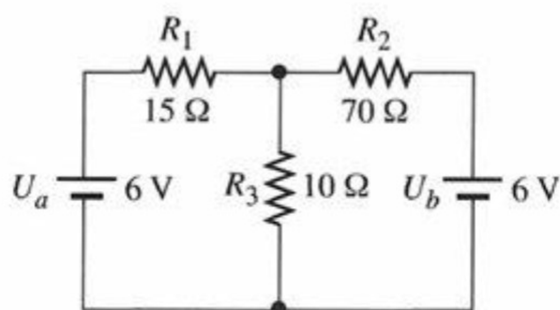
בכל אחד מהמעגלים שבאיור 9-14, מסומנים זרמים. באילו ממעגלים אלה – לא ייתכן שכל כיווני הזרמים הם כמסומן באיור זה?



איור 9-14

שאלה 9-2

חשב את הזרם בנגד R_3 במעגל שבאיור 9-15.



איור 9-15

שאלה 9-3

הנח כי $R_2 = 15\ \Omega$ (ולא $70\ \Omega$) במעגל שבאיור 9-15. חשב את הזרם בנגד R_3 במעגל זה.

שאלה 9-4

א. נחזור למעגל המקורי שבאיור 9-15. מגדילים כפליים את המתח של כל אחד ממקורות המתח שבאיור 9-15. חשב את הזרם בנגד R_3.

ב. מגדילים כפליים גם את כל אחת מההתנגדויות שבאיור 9-15. מה יהיה עכשיו הזרם בנגד R_3?

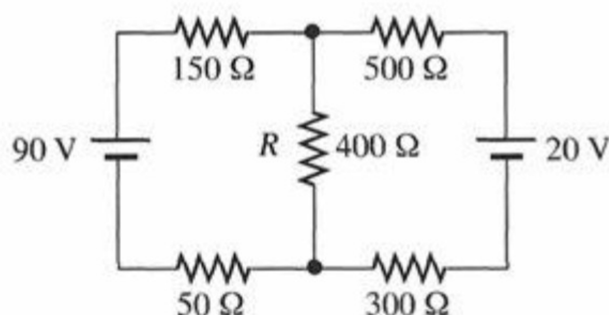
שאלה 9-5

א. הפוך את כיוון כל אחד מהזרמים המסומנים במעגל שבאיור 9-9, וחשב את המתח על הנגד R_2.

ב. חשב את המתח על הנגד R_2 במעגל המקורי שבאיור 9-9. האם קיבלת אותה תוצאה?

שאלה 9-6

חשב את הספק הנגד R במעגל שבאיור 9-16.



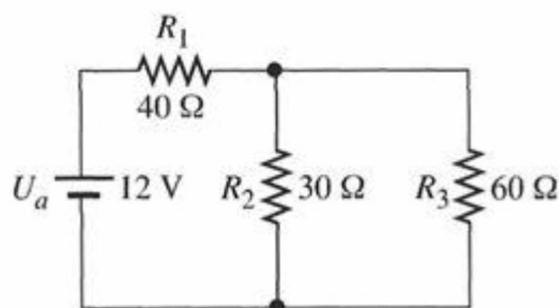
איור 9-16

שאלה 9-7

א. חשב את הזרם בנגד R_1 אשר במעגל שבאיור 9-17, תוך שימוש בהתנגדות שקולה בטור ובמקביל.

ב. חזור וחשב את הזרם בנגד R_1, תוך שימוש בשיטת זרמי החוגים.

איזו שיטה תעדיף לגבי מעגל זה? נמק את תשובתך.



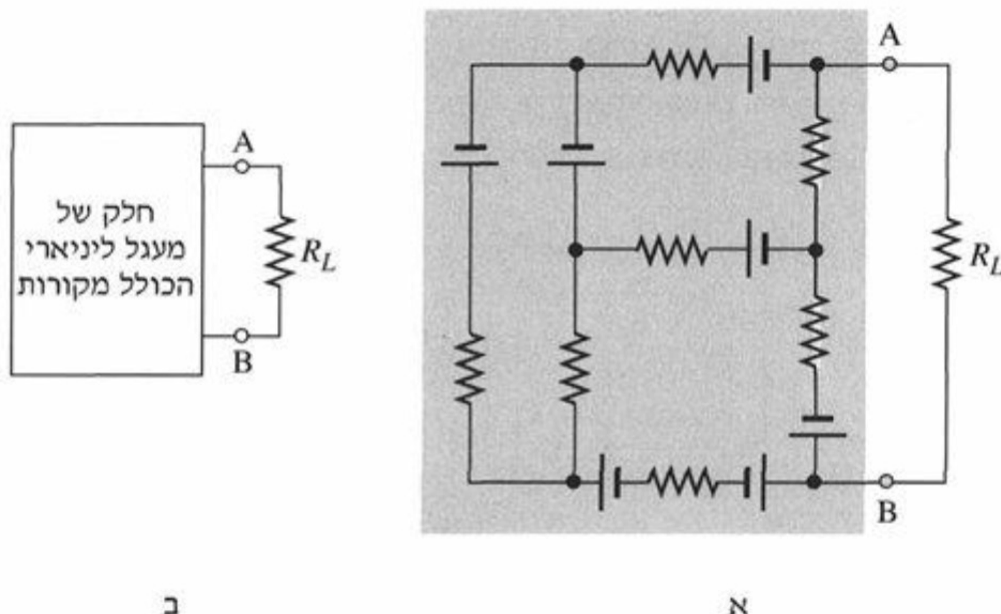
איור 9-17

9.2 משפט תבנין

עד כה ראינו כי אפשר לקבלת מעגל שקול למעגל נתון, באמצעות התנגדות שקולה בטור או במקביל. הייצוג השקול, שנלמד בסעיף זה, מיועד להחליף הן מקורות והן נגדים במעגל המקורי – על-ידי רכיבים שקולים. ייצוג זה מבוסס על משפט תבנין (Thevenin's theorem).

משפט תבנין תָקֵף לגבי מעגלים, המכילים רק רכיבים ליניאריים (linear components). לצורך דיוננו כאן, נגדיר רכיב ליניארי כרכיב, אשר הקשר בין המתח עליו לזרם דרכו – מתואר על-ידי קו ישר. דוגמאות לרכיבים ליניאריים: נגדים; ומקורות מתח (אידיאליים וממשיים). מעגל ליניארי הוא מעגל, המכיל רק רכיבים ליניאריים.

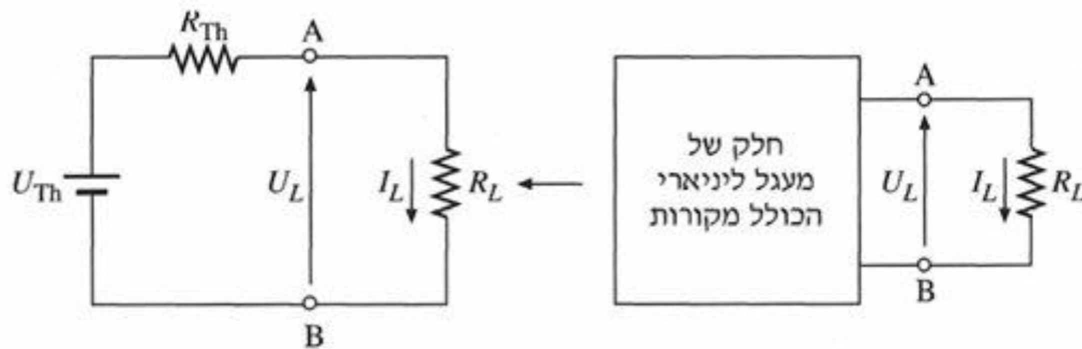
בטרם נביא את משפט תבנין, נתבונן בשני המעגלים המתוארים באיור 9-18. באיור 9-18א נתון מעגל ליניארי כלשהו, המכיל מקורות מתח. למעגל זה, המסומן על-ידי המלבן האפור שבאיור, יש שני הדקי מוצא, A ו-B, וצרכן R_L מחובר בין הדקים אלה. באיור 9-18ב מייצג המלבן האפור את חלק המעגל הליניארי. חלק זה כולל מקורות מתח. בהמשך הסעיף ניווכח כי יש מקורות חשמל נוספים – ולא רק מקורות מתח.



איור 9-18 מעגל ליניארי, המכיל מקורות חשמל, מחובר לצרכן R_L

משפט תבנין טוען כי כל חלק של מעגל ליניארי, המכיל מקור חשמל אחד לפחות (למשל: איור 9-19א), ניתן לייצוג על-ידי מעגל שקול, המורכב ממקור מתח אידיאלי U_{Th}, שאליו מחובר בטור נגד R_{Th} (איור 9-19ב). המעגל השקול נקרא לפעמים גם **מעגל תבנין**; U_{Th}

נקרא לפעמים **מתח תבנין**, ו-R_{Th} – **התנגדות תבנין**. מעגל תבנין כולל רק את U_{Th} ואת R_{Th}, אך לא את הצרכן.

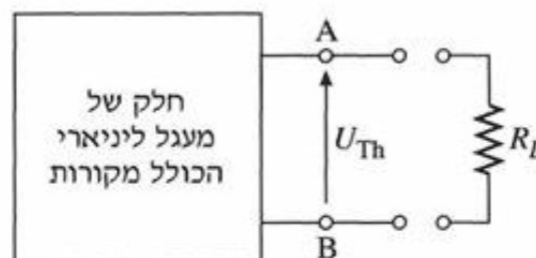


ב – מעגל תבנין של חלק המעגל הליניארי   א – חלק של מעגל ליניארי

איור 9-19 חלק של מעגל ליניארי ומעגל תבנין שלו ; שני המעגלים מחוברים לצרכנים זהים

כדי למצוא מעגל תבנין, עלינו למצוא את U_{Th} ואת R_{Th}. ניתן להוכיח (אך ההוכחה חורגת ממסגרת לימודינו), כי המתח U_{Th} הוא מתח המעגל הפתוח – בין שני ההדקים A ו-B – במעגל המקורי (כלומר, המעגל הליניארי הכולל מקורות).

כלומר, אם ננתק את הצרכן R_L במעגל, המתואר באיור 9-19, יהיה המתח U_{Th} כמסומן באיור 9-20 ; וההתנגדות R_{Th} היא ההתנגדות ש״רואה״ הצרכן בין שני ההדקים A ו-B במעגל (וליֶתֶר דיוק : בחלק המעגל הליניארי הכולל מקורות), כאשר כל המקורות במעגל זה – **משותקים** (killed).



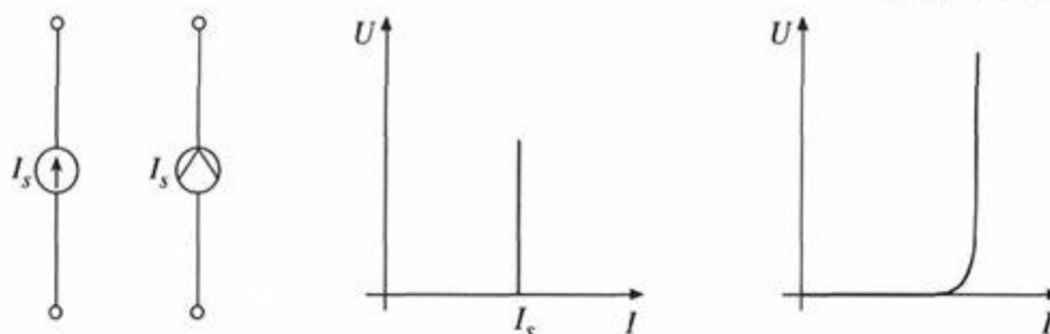
איור 9-20 מתח תבנין

מה זה מקור משותק? כדי להסביר את המושג **מקור מתח משותק**, נחזור תחילה על הקשר שבין מקור ממשי למקור אידיאלי. כאמור, ניתן לייצג מקור מתח ממשי – על-ידי מקור מתח אידיאלי, שאליו מחובר נגד, כך שהתנגדות הנגד שווה להתנגדות הפנימית של מקור המתח. מקור מתח משותק הוא מקור שאינו פעיל. **מקור מתח משותק הוא מקור מתח, המיוצג על-ידי התנגדותו הפנימית בלבד, כשמקור המתח האידיאלי – מקוצר.**

מה המשמעות של "... כאשר כל המקורות במעגל זה – משותקים"?. האם יש מקור משותק, שאינו מקור מתח?

כן. יש התקנים, המשמשים כמקורות אנרגיה במעגל, ומספקים זרם, שאינו תלוי – למעשה – ברכיבי המעגל האחרים, או במתח על הדקי המקור. אופיין מתח–זרם מסוים של התקן כזה – הטרנזיסטור – נתון באיור 9-21א. באופיין זה יש תלות-מה של הזרם במתח.

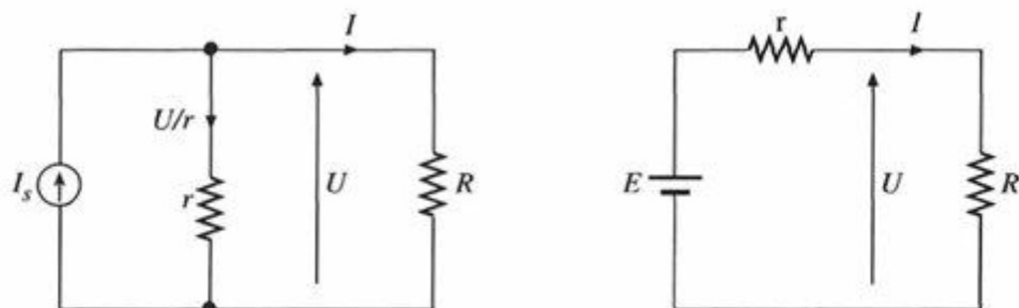
נוכל לתאר לעצמנו התקן אידיאלי, אשר האופיין מתח-זרם שלו יהיה כמתואר באיור 9-21ב. מקור מתח כזה נקרא **מקור זרם אידיאלי** (ideal current source). מקור כזה מספק זרם קבוע, ללא תלות במתח על הדקי המקור. באיור 9-21ג נתונים סימונים מקובלים של מקור זרם אידיאלי.



א – אופיין מסוים של טרנזיסטור ב – אופיין של מקור זרם אידיאלי ג – סימונים מקובלים של מקור זרם אידיאלי

איור 9-21 אופייני מתח-זרם של מקורות זרם וסימונים מקובלים של מקור זרם אידיאלי

בדומה למקור מתח, גם למקור זרם יכולה להיות – באופן עקרוני – התנגדות פנימית. באיור 9-22 נתונים שני מעגלים: מקור מתח, המחובר לצרכן; ומקור זרם, המחובר לצרכן. ניתן להראות כי מקור מתח ממשי, שהתנגדותו הפנימית R, ניתן לתיאור על-ידי מקור זרם אידיאלי, שאותו נגד R מחובר אליו במקביל – אם הזרם, שיוצר מקור הזרם האידיאלי, נתון על-ידי $I_s = \frac{U}{r}$ (E – הכא"מ של מקור המתח האידיאלי).



א – מקור מתח המחובר לצרכן ב – מקור זרם המחובר לצרכן

איור 9-22 מקור מתח ומקור זרם מחוברים לצרכנים

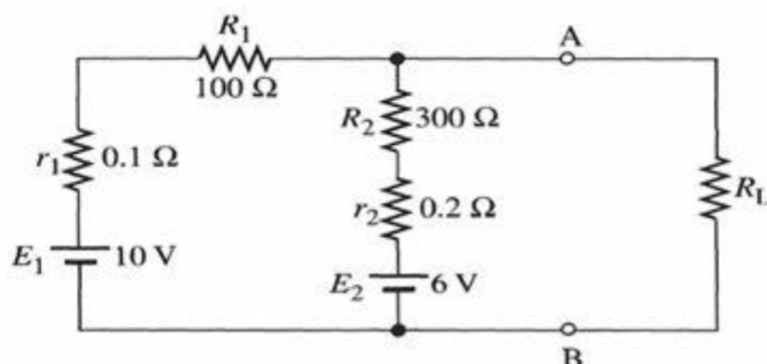


דוגמה 9-3

א. חשב את מתח תבנין U_{Th} בין הנקודות A ו-B במעגל, המתואר באיור 9-23.

ב. חשב את התנגדות תבנין, שאותה "רואה" הצרכן במעגל זה.

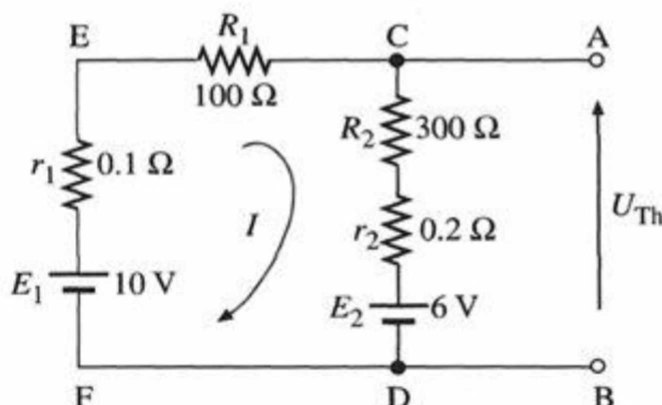
ג. סרטט את מעגל תבנין השקול של מעגל זה.



איור 9-23

פתרון

א. ננתק את הצרכן R_L, ונקבל את המעגל המתואר באיור 9-24.



איור 9-24 המעגל המתקבל מאיור 9-23, לאחר ניתוק הצרכן R_L

לפי חוק המתחים של קירכהוף בחוג ECDFE, מקבלים:

$$E_1 - I(r_1 + R_1 + R_2 + r_2) - E_2 = 0$$

ומכאן:

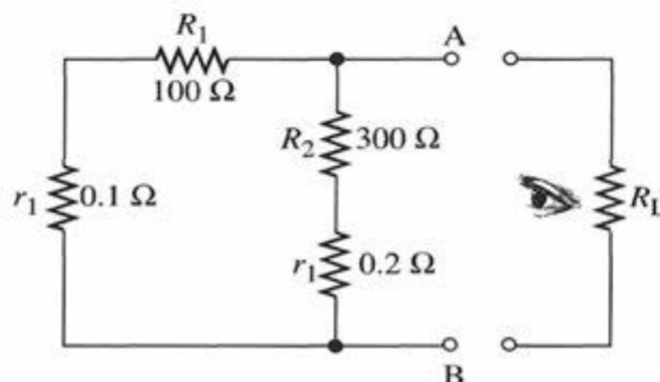
$$I = \frac{E_1 - E_2}{r_1 + R_1 + R_2 + r_2} = \frac{10-6}{0.1+100+300+0.2} = 9.99\text{mA} \approx 0.01\text{A}$$

עתה נוכל לחשב את U_{Th}:

$$U_{Th} = E_2 + IR_2 + Ir_2 \approx 6 + 0.01 \times 300 + 0.01 \times 0.2 \approx 9\text{ V}$$

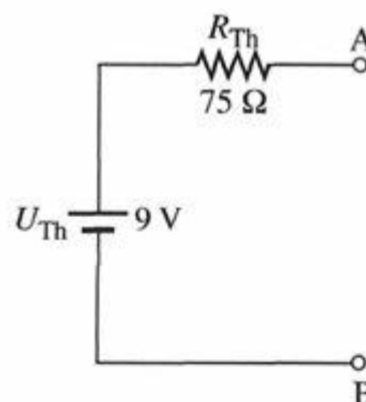
ב. נקצר את מקורות המתח, כך שכל מקור מתח יהיה מיוצג על-ידי ההתנגדות הפנימית שלו בלבד. נקבל את המעגל, המתואר באיור 9-25. ההתנגדות, ש"רואה" הצרכן R_L במעגל זה, היא ההתנגדות השקולה של ארבעת הנגדים: R_1, r_1, R_2, r_2. התנגדות שקולה זו היא התנגדות תבנין (R_{Th}). נקבל אפוא כי

$$R_{\text{Th}} = (R_1 + r_1) \,||\, (R_2 + r_2) = \frac{(R_1 + r_1)(R_2 + r_2)}{R_1 + r_1 + R_2 + r_2} = \frac{100.1 \times 300.2}{400.3} \approx 75\,\Omega$$

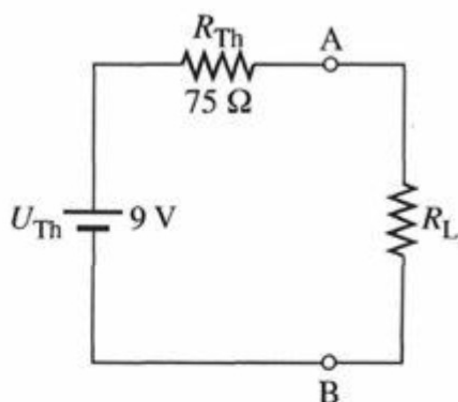


איור 9-25 ההתנגדות ש"רואה" הצרכן R_L, לאחר קיצור מקורות המתח וניתוק מקורות הזרם

ג. מעגל תבנין השקול מתואר באיור 9-26א. המעגל, השקול לזה המתואר באיור 9-23, מתואר באיור 9-26ב.



א – מעגל תבנין של המעגל המתואר באיור 9-25



ב – המעגל השקול למעגל המתואר באיור 9-23

איור 9-26



נניח שנתון מעגל, שבו מחברים בכל פעם נגד שונה (או נגד משתנה) בין שתי נקודות A ו-B, ויש לחשב את הזרם (או המתח) בנגד בכל אחד מהמקרים. במעגל כזה בולט במיוחד יתרון

השימוש במשפט תבנין, בהשוואה לשיטות אחרות לפתרון מעגלים (למשל: שיטת זרמי החוגים). נבהיר זאת.

כל אחד מהצרכנים "רואה" את אותו מעגל תבנין, כי מתח תבנין (U_{Th}) והתנגדות תבנין (R_{Th}) אינם תלויים בצרכן. לכן די אם נחשב פעם אחת את U_{Th} ואת R_{Th}, ואז נוכל למצוא את הזרם I_L בצרכן, על-ידי פתירת מעגל טורי פשוט, הכולל מקור מתח U_{Th} ושני נגדים, R_{Th} ו-R_L (איור 9-19ב), כלומר:

$$I = \frac{U_{Th}}{R_{Th} + R_L}$$

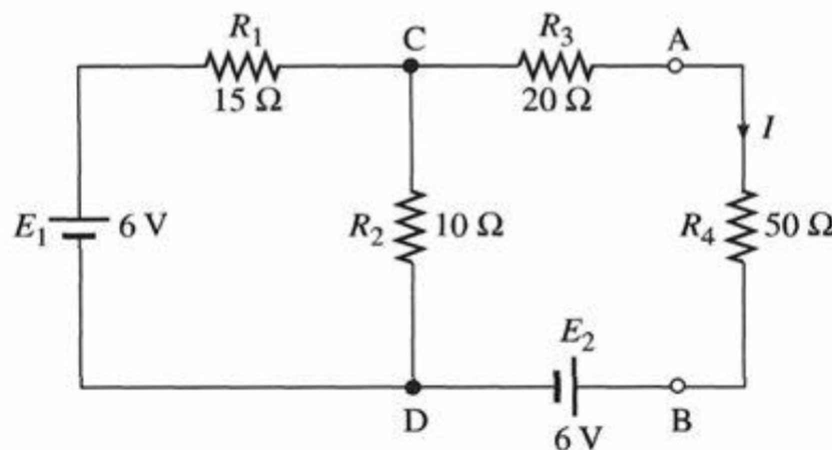
הזרמים בנגדים השונים, שנחבר למעגל, יתקבלו על-ידי הצבת הערכים המתאימים של התנגדויות הצרכן – R_L במשוואה זו. כאמור, מחשבים רק פעם אחת את U_{Th} ו-R_{Th}, ומשתמשים בערכים אלה לכל אחת מהתנגדויות הצרכן.



דוגמה 9-4

א. השתמש במשפט תבנין, וחשב את הזרם I בנגד R_4 (איור 9-27).

ב. חזור על סעיף א, אלא שהנגד R_4 הוחלף בנגד, שהתנגדותו $25\ \Omega$.



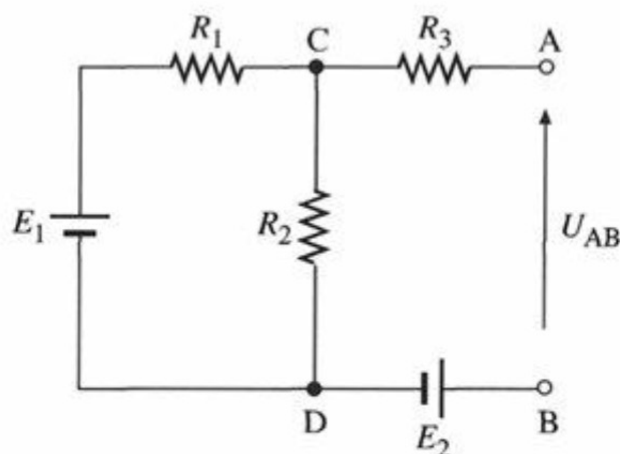
איור 9-27

פתרון

א. לצורך חישוב מתח תבנין (U_{Th}), ננתק את R_4, ונקבל את המעגל, המתואר באיור 9-28. לפי חוק המתחים של קירכהוף, המתח U_{Th} נתון על-ידי

$$U_{Th} = U_{AB} = U_{CD} - E_2$$

(בנגד R_3 לא זורם זרם, והמתח עליו הוא אפס.)



איור 9-28

את המתח U_{CD} נחשב לפי כלל מחלק המתח:

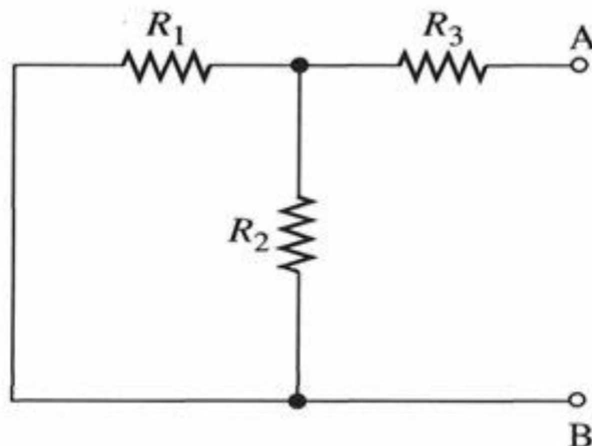
$$U_{CD} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} E_1 = \frac{10}{10+15} \times 6 = 2.4 \text{ V}$$

ומכאן:

$$U_{Th} = U_{CD} - E_1 = 2.4 - 6 = -3.6 \text{ V}$$

כדי לחשב את R_{Th}, נקצר את מקורות המתח E_1, ו-E_2. ההתנגדות R_{Th}, ש"רואה" הנגד R_4 בין הנקודות A ו-B, מתוארת באיור 9-29. התנגדות זו נתונה על-ידי

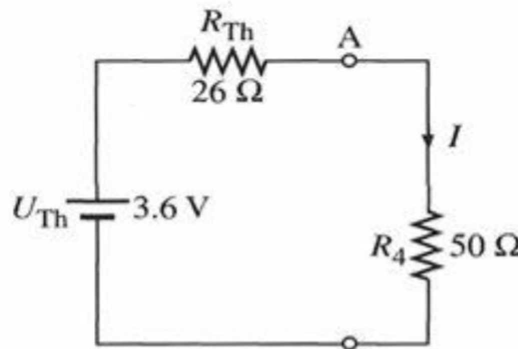
$$R_{Th} = (R_1 \parallel R_2) + R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3 = \frac{15 \times 10}{15+10} + 20 = 26\ \Omega$$



איור 9-29

באיור 9-30 מתואר המעגל הטורי השקול למעגל, המתואר באיור 9-27. המעגל השקול כולל את מעגל תבנין ואת הנגד R_4. הזרם I בנגד R_4 נתון על-ידי

$$I = \frac{U_{Th}}{R_{Th} + R_4} = \frac{-3.6}{26 + 50} = -47.4 \text{ mA}$$



איור 9-30

ב. כל שעלינו לעשות עתה, הוא להחליף במעגל שבאיור 9-30 את R_4 בנגד, שהתנגדותו 25 Ω, ולחשב את הזרם I לאחר החלפת הנגד. ובכן,

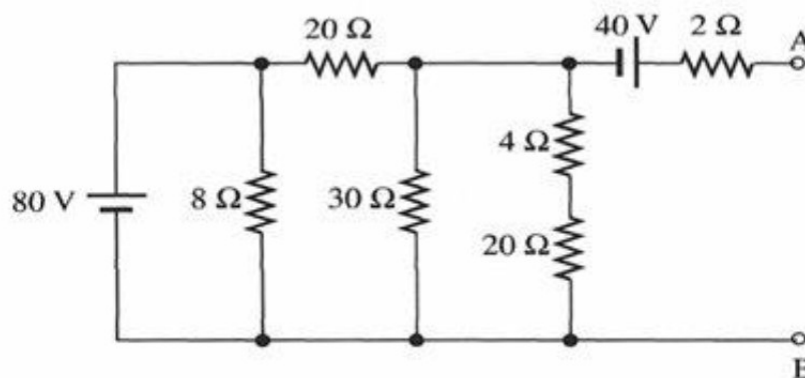
$$I = \frac{U_{Th}}{R_{Th} + R_4} = \frac{-3.6}{26 + 25} = -70.6 \text{ mA}$$



שאלות חזרה

שאלה 9-8

חשב את מתח תבנין ואת התנגדות תבנין של המעגל, המתואר באיור 9-31.



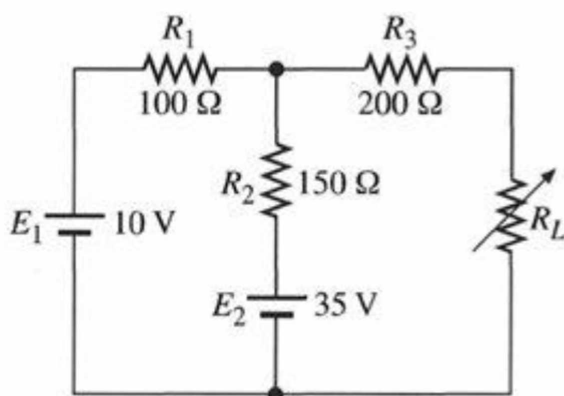
איור 9-31

שאלה 9-9

הנגד R_L במעגל, המתואר באיור 9-32, הוא נגד משתנה.
חשב – בעזרת משפט תבנין – את הזרם בנגד זה:

א. כאשר $R_L = 250\ \Omega$

ב. כאשר $R_L = 500\ \Omega$

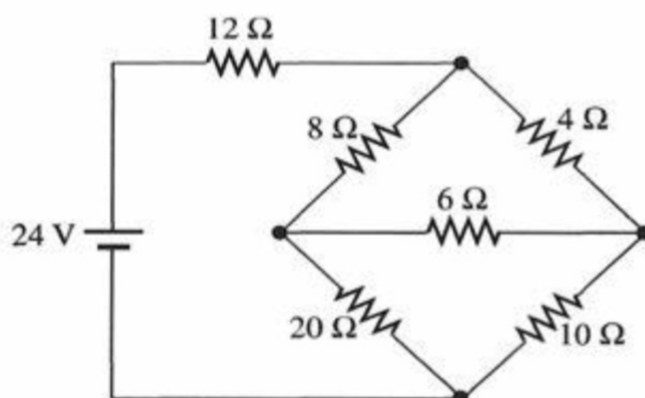


איור 9-32

שאלה 9-10

חשב את הזרם בכל אחד מהנגדים במעגל, המתואר באיור 9-33. השתמש לשם כך בשיטת זרמי החוגים ובמשפט תבנין.

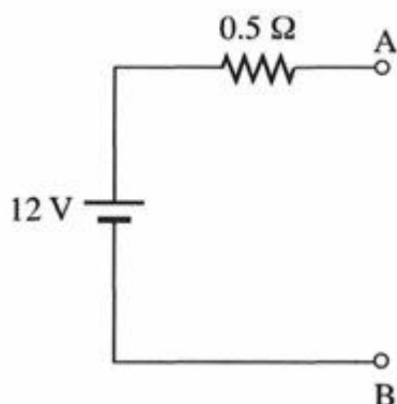
איזו משתי השיטות עדיפה, לדעתך, לחישוב הזרמים? נסה לנמק.



איור 9-33

שאלה 9-11

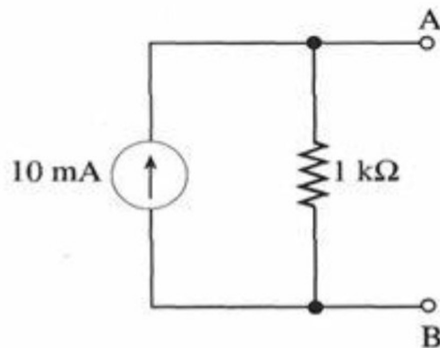
הפוך את מקור המתח, הנתון באיור 9-34, למקור זרם שקול, וסרטט מקור זה.



איור 9-34

שאלה 9-12

הפוך את מקור הזרם, הנתון באיור 9-35, למקור מתח שקול, וסרטט מקור זה.



איור 9-35

סיכום פרק 9

- כדי לפתור מעגלים, הכוללים חוגים אחדים, לא די – בדרך כלל – להשתמש בכללי החיבור של נגדים ובשיקולים פיזיקליים פשוטים לגבי כיווני הזרמים, וחלוקתם בין נגדי המעגל. חוקי קירכהוף וחוק אום הם היסוד לשיטות השונות, שפותחו לפתרון מעגלים חשמליים. בפרק זה עסקנו בלימוד שיטות אלה. בפרק זה למדנו שיטות אחדות לפתרון מעגלים:
  - שיטת זרמי החוגים
  - משפט תבנין

- שיטת זרמי החוגים מאפשרת לכתוב משוואות המתחים במעגל – בצורה קלה ומהירה, כך שאין צורך לשקול, מהו הסימן של כל איבר במשוואות אלה.

- במשפט תבנין נוח מאוד להשתמש לפתרון מעגל, שבו מחברים בכל פעם נגד שונה (או נגד משתנה) בין שתי נקודות במעגל, ויש לחשב את הזרם (או המתח) בנגד בכל אחד מהמקרים.

10
קיבול וקבלים

בפרקים הקודמים למדנו על המעגל החשמלי ורכיביו. עד כה עסקנו בעיקר ברכיבים הבאים: מקורות מתח, נגדים, תַּיִלִים מוליכים ומתגים. למדנו כי אחת התכונות המאפיינות את הנגדים במעגל היא, שברכיבים אלה אנרגיה חשמלית הופכת לחום.

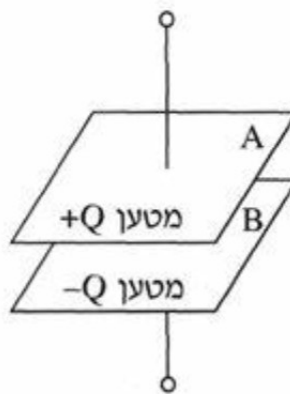
אם נרצה להשתמש בחום, שנוצר בנגדים, כדי ליצור אנרגיה חשמלית, נגלה כי האנרגיה החשמלית שנקבל קטנה מהאנרגיה החשמלית, שהושקעה בתהליך החימום של הנגדים. לכן נהוג לומר כי נגדים מבזבזים אנרגיה חשמלית (מובן כי האנרגיה הכוללת אינה משתנה, וחוק שימור האנרגיה נשמר).

בפרק זה נלמד על רכיב, המסוגל - באופן עקרוני - לאגור אנרגיה חשמלית, ואחר-כך להעביר את האנרגיה החשמלית במלואה לרכיבים אחרים במעגל. רכיב כזה הוא הקבל.

10.1 קבל לוחות וקיבולו

באיור 10-1 מתואר התקן הבנוי משני לוחות מתכתיים. אחד הלוחות טעון במטען חיובי Q, והלוח השני טעון במטען שלילי $-Q$, השווה בגודלו למטען החיובי. התקן כזה נקרא קבל לוחות, הטעון במטען Q (כאשר $Q = 0$, נאמר כי קבל הלוחות אינו טעון). בסעיף הבא ניווכח כיצד אפשר לטעון את לוחות הקבל במטענים מנוגדים, כלומר: במטענים שווים בגודלם והפוכים בסימנם.

נתבונן שוב בקבל הלוחות שבאיור 10-1. הקבל בנוי משני לוחות מתכתיים מקבילים. הלוחות קרובים זה לזה, אך אינם נוגעים זה בזה. בין הלוחות יש מבדד (למשל: אוויר).



איור 10-1 קבל לוחות, הבנוי משני לוחות מתכתיים A ו-B

מתח על קבל

על-סמך דיוננו בפרק 2, נסיק כי בין שני לוחות טעונים קיים הפרש פוטנציאלים, כלומר: מתח. מכאן שקיים מתח בין הלוחות של קבל טעון, ובקיצור: קיים מתח על הקבל. ניסויים הראו כי ככל שטוענים קבל מסוים במטען גדול יותר, גָדֵל המתח על הקבל.

יש גבול למטען, שנוכל להניח על כל אחד מלוחות הקבל. אם ננסה לטעון את לוחות הקבל במטען גדול מדי, ייווצר מתח כה גדול בין לוחות הקבל, שכתוצאה מכך עלול המבדד, שבין לוחות הקבל, להפוך למוליך. במצב זה – מטענים עלולים לעבור מלוח ללוח, כשהם נעים בין הלוחות. אומרים אז כי **הקבל נפרץ**. בהמשך הפרק נדון בפריצת קבל.

קיבול של קבל

אנו מסיקים כי קבל יכול להכיל כמות מסוימת של מטען, לפני שהוא נפרץ. אם-כן, ניתן לומר כי לקבל יש **תכולה של מטען** או **קיבול של מטען** ובקיצור: **קיבול**. בהמשך נגדיר בצורה מדויקת את קיבול הקבל.

אם כתוצאה מתוספת גדולה של מטען על קבל, המתח על הקבל גָדֵל רק במעט, הרי שנוכל להוסיף על הקבל מטען רב לפני שייפרץ. נאמר אז כי לקבל יש קיבול גדול. ולהיפך, אם כתוצאה מתוספת קטנה של מטען על קבל, המתח על הקבל גָדֵל במידה רבה, הרי שלקבל יש קיבול קטן.

אנו רואים כי יש קשר בין שלושה גדלים: מטען הקבל, המתח על הקבל וקיבול הקבל. כדי למצוא מהו הקשר הזה, ניעזר בתוצאות של ניסויים שנערכו בקבלים. אנו יודעים כי כאשר נתון קבל מסוים, וטוענים אותו במטען Q, נוצר על הקבל – כתוצאה מכך – מתח מסוים U.

ניסויים הראו כי אם טוענים את אותו קבל במטען $2Q$, המתח הנוצר על הקבל הוא $2U$, ואם טוענים את הקבל הזה במטען $3Q$, המתח על הקבל הוא $3U$.

מתוצאות ניסויים אלה ואחרים, נוכל להסיק כי **קיים יחס קבוע בין מטען הקבל, לבין המתח על הקבל**. יחס קבוע זה נקרא **קיבול הקבל**.

אם-כן,

קיבול הקבל הוא היחס בין המטען Q של הקבל – לבין המתח U על הקבל.

נסמן את הקיבול באות C*, ונקבל כי קיבול הקבל נתון על-ידי

$$C = \frac{Q}{U} \qquad (10\text{-}1)$$

C – קיבול

Q – מטען

U – מתח

ובמילים:

$$\text{קיבול קבל} = \frac{\text{מטען הקבל}}{\text{המתח על הקבל}}$$



דוגמה 10-1

מטען קבל הוא $Q =$ 0.00006 קולון, והמתח על הקבל הוא 12 וולט. מהו קיבול הקבל?

פתרון

נתון כי מטען הקבל הוא $Q =$ 0.00006 קולון, והמתח על הקבל הוא 12 וולט. נציב ערכים אלה במשוואת הקיבול, ונקבל כי קיבול הקבל הוא – לפי משוואה (10-1),

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{0.00006}{12} = 0.000005 = 5\times10^{-6}\,\frac{\text{קולון}}{\text{וולט}}$$



---

* אל תבלבל בין הקיבול לבין יחידת המטען קולון, אף על פי ששניהם מסומנים באותה אות – C. הקיבול הוא גודל פיזיקלי, ואילו יחידת המטען היא יחידת מדידה. בדרך-כלל יהיה ברור מן התוכן, אם הכוונה לקיבול או ליחידה קולון. בכל פעם שיהיה חשש לבלבול, נאמר במפורש מה מציינת האות C.

יחידות הקיבול

אנו רואים כי יחידת הקיבול היא קולון חלקי וולט. ליחידה זו קוראים **פאראד**, ומסמנים אותה באות F. כלומר,

$$\text{פאראד} = \frac{\text{קולון}}{\text{וולט}}$$

או

$$1\,\mathrm{F} = \frac{1\,\mathrm{C}}{1\,\mathrm{V}}$$

מכאן שקיבול הקבל בדוגמה 10-1 הוא 0.000005 פאראד, או 0.000005 F.

נגדיר אפוא את יחידת הקיבול בצורה זו:

קיבול של קבל הוא פאראד אחד (1 F), אם מטען של קולון אחד (1 C) גורם למתח של וולט אחד (1 V) בין לוחות הקבל.

הפאראד הוא יחידת קיבול גדולה מדי, שאינה נוחה לשימוש. לדוגמה: לפעמים קיבול של 0.000005 F (שקיבלנו בדוגמה 10-1) אינו נחשב לקיבול קטן כלל וכלל; במעגלים רבים משתמשים בקבלים, שהקיבול שלהם קטן בהרבה מקיבול זה. לכן מקובל להשתמש ביחידות קיבול קטנות יותר, והן: מיקרו-פאראד, ננו-פאראד ופיקו-פאראד.

מיקרו-פאראד הוא מיליונית הפאראד, והוא מסומן על-ידי μF (μ - האות היוונית מְיוּ). כלומר:

$$1\,\mu\mathrm{F} = \frac{1}{1,000,000}\mathrm{F} = \frac{1}{10^6}\mathrm{F} = 10^{-6}\mathrm{F}$$

ננו-פאראד (nF) נתון על-ידי

$$1\,\mathrm{nF} = \frac{1}{1,000,000,000}\mathrm{F} = \frac{1}{10^9}\mathrm{F} = 10^{-9}\mathrm{F}$$

פיקו-פאראד (pF) נתון על-ידי

$$1\mathrm{pF} = \frac{1}{1,000,000,000,000}\mathrm{F} = \frac{1}{10^{12}}\mathrm{F} = 10^{-12}\mathrm{F}$$

על-סמך ההגדרות של יחידות הקיבול השונות, ניתן לקבל את הקשרים הבאים:

$1\,\mu\mathrm{F} = 1,000\,\mathrm{nF}$

$$1\ nF = 1{,}000\ pF$$

ולכן

$$1\ \mu F = 1{,}000{,}000\ pF$$

אנו משאירים כתרגיל ללומד את ההוכחה של קשרים אלה.



דוגמה 10-2

א. בטא את קיבול הקבל, הנתון בדוגמה 10-1, ביחידות µF.

ב. נתון כי קיבול קבל הוא 0.2 µF. בטא את הקיבול ביחידות פאראד.

ג. נתון כי קיבול קבל הוא 20 nF. בטא את הקיבול ביחידות פאראד.

ד. נתון כי קיבול קבל הוא 500,000 pF. בטא את הקיבול ביחידות nF וביחידות µF.

פתרון

א. קיבול הקבל שבדוגמה 10-1 הוא 5×10^{-6} קולון לוולט, כלומר: 5×10^{-6} F. כאמור, $1\ \mu F = 10^{-6}\ F$, ולכן

$$5 \times 10^{-6}\ F = 5\ \mu F$$

ב. הקיבול הנתון הוא 0.2 µF, כלומר: $0.2 \times 10^{-6}\ F$.

ג. הקיבול הנתון הוא 20 nF, כלומר: $20 \times 10^{-9}\ F$.

ד. הקיבול הנתון הוא 500,000 pF, כלומר: $500{,}000 \times 10^{-12}\ F$. ראינו כי

$$1{,}000\ pF = 1\ nF$$

כלומר:

$$1\ pF = \frac{1}{1{,}000}\ nF$$

ומכאן נקבל כי

$$500{,}000\ pF = \frac{500{,}000}{1{,}000}\ nF = 500\ nF$$

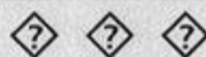
כן ראינו כי

$$1{,}000{,}000\ pF = 1\ \mu F$$

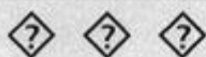
ומכאן:

$$500{,}000\ pF = \frac{500{,}000}{1{,}000{,}000}\ \mu F = 0.5\ \mu F$$





שאלות חזרה



שאלה 10-1

סמן את הביטוי הנכון מבין כל זוג ביטויים מודגשים:

קבל לוחות בנוי משני לוחות **מתכתיים/מבודדים** מקבילים. הלוחות **נוגעים/אינם נוגעים** זה בזה. בין הלוחות יש **מתכת/מבדד**.

שאלה 10-2

"קבל טעון במטען Q." מה פירוש טענה זו?

א. סכום המטענים בלוחות הקבל הוא Q.

ב. כל אחד מלוחות הקבל טעון במטען Q.

ג. לוח אחד של הקבל טעון במטען Q, והלוח השני טעון במטען $-Q$.

ד. ההפרש בין המטענים של לוחות הקבל הוא Q.

שאלה 10-3

קיבול קבל מוגדר כיחס בין...

א. מתח וזרם	ב. מטען וזרם	ג. זרם ומתח
ד. מטען ומתח	ה. זרם ומטען	ו. מתח ומטען

שאלה 10-4

מטען קבל הוא $0.00003\ C$, והמתח על הקבל הוא 220 V. חשב את קיבול הקבל ביחידות F וביחידות μF.

שאלה 10-5

קיבול קבל הוא 5 μF. המתח על הקבל הוא 12 V. מהו מטען הקבל?

שאלה 10-6

קיבול קבל הוא 6 μF. מטען הקבל הוא 0.0003 C. מהו המתח על הקבל?

שאלה 10-7

המתח על קבל הוא 12 V. מטען הקבל הוא 0.00003 C. מהו קיבול הקבל?

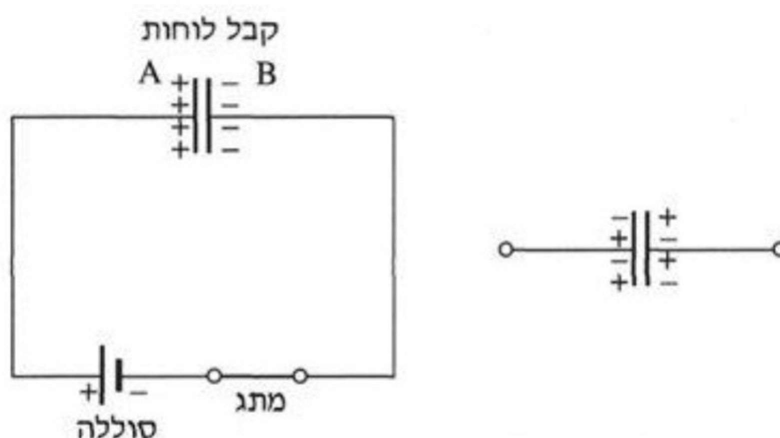
10.2 טעינת קבל על-ידי סוללה

בסעיף הקודם ראינו כי קבל לוחות טעון הוא קבל, שלוחותיו טעונים במטענים **שווים בגודלם והפוכים בסימנם**. כלומר: לוחות הקבל טעונים במטענים **מנוגדים**. עתה נראה כיצד אפשר לטעון את לוחות הקבל במטענים מנוגדים.

טעינת קבל במטענים מנוגדים

באיור 10-2א מתואר קבל לא טעון. כדי לטעון את לוחות הקבל (או שני מוליכים אחרים) במטענים מנוגדים, אפשר להסיר מטען שלילי $-Q$ מלוח אחד של הקבל, ולהעביר מטען זה ללוח השני. ללוח הראשון יהיה עודף מטען חיובי Q, ומכאן שהוא יהיה טעון במטען חיובי $+Q$; ואילו הלוח השני יקבל מטען שלילי $-Q$, כלומר: לוח זה יהיה טעון במטען שלילי $-Q$. אם-כן, שני הלוחות יהיו טעונים במטענים מנוגדים.

באיור 10-2ב מתוארת שיטה מעשית ומִיָּדִית לטעינת לוחות קבל במטענים מנוגדים. הקבל מחובר לסוללה באמצעות תַּיִלִים מוליכים (אנו נתעלם כאן מהתנגדות התַּיִלִים המוליכים. מלבד זאת, המעגל שבאיור 10-2ב אינו מכיל נגד, אך בחיבור מעשי של קבל לסוללה, מוסיפים נגד בטור לסוללה, כפי שניווכח בהמשך הפרק).



א – דוגמה של קבל לא טעון

ב – קבל מחובר לסוללה באמצעות תַּיִלִים מוליכים

איור 10-2 טעינת קבל על-ידי סוללה

כשסוגרים את המתג במעגל שבאיור 10-2ב, נדחים אלקטרונים חופשיים מההדק השלילי של הסוללה, דרך התיל המוליך, אל הלוח B של הקבל. באותו זמן, ההדק החיובי של הסוללה מושך אותו מספר של אלקטרונים מהלוח A של הקבל. נחזור ונציין כי כיוון תנועת האלקטרונים במעגל – הפוך לכיוון הזרם המוסכם.

אם-כן, מספר האלקטרונים, שנוספו ללוח B של הקבל, שווה למספר האלקטרונים שנגרעו מהלוח A של הקבל. מכאן שהלוח A טעון במטען חיובי, השווה בגודלו למטען השלילי של הלוח B. מכאן שלוחות הקבל נטענו במטענים מנוגדים, כלומר: שווים בגודלם והפוכים בסימנם.

כמות המטען שבה ניתן לטעון קבל

האם לוחות הקבל ימשיכו להיטען ללא הפסקה? כאמור, תנועה מכוּוֶנת של אלקטרונים במוליך – נגרמת על-ידי הפרש פוטנציאלים. אם אלקטרונים רבים יילכו ויצטברו על הלוח השלילי של הקבל, הפוטנציאל של הלוח השלילי יהיה שווה לבסוף לפוטנציאל ההדק השלילי של הסוללה.

במצב זה לא יהיה עוד הפרש פוטנציאלים בין ההדק השלילי של הסוללה לבין הלוח השלילי של הקבל, ותנועת האלקטרונים ביניהם תיפסק. באופן דומה נקבל כי במצב זה – גם בין ההדק החיובי של הסוללה לבין הלוח החיובי של הקבל – לא יהיה הפרש פוטנציאלים, וגם ביניהם תיפסק תנועת האלקטרונים.

מכאן שתנועת האלקטרונים במעגל תימשך, עד שפוטנציאל הלוח B של הקבל – יהיה שווה לפוטנציאל ההדק השלילי של הסוללה; ופוטנציאל הלוח A של הקבל יהיה שווה לפוטנציאל ההדק החיובי של הסוללה. במילים אחרות: **תנועת האלקטרונים במעגל תימשך, עד שהמתח על הקבל יהיה שווה למתח בין הדקי הסוללה**.

ואכן, במשך זמן קצר מאוד יש במעגל תנועה מכוּוֶנת של אלקטרונים (כלומר, זרם). אבל נדגיש כי **שום זרם אינו זורם ישירות מלוח אחד של הקבל אל הלוח השני, דרך המרווח ביניהם**.

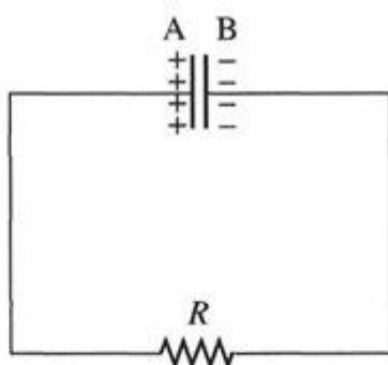
כשהזרם במעגל נפסק, הקבל טעון במטען Q, כלומר: הלוח B טעון במטען $-Q$, והלוח A טעון במטען $+Q$. כאמור, המתח U_{AB} על הקבל יהיה שווה אז – בגודלו – למתח הסוללה. גם לאחר שננתק את הקבל מהסוללה, ימשיך הקבל להיות טעון.

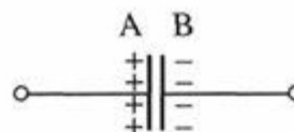
פריקת קבל

באיור 10-3א מתואר קבל טעון. אם נחבר כעת נגד ללוחות הקבל, כמתואר באיור 10-3ב, האלקטרונים ינועו דרך הנגד, מהלוח B ללוח A. לוחות הקבל יפסיקו להיות טעונים, ונאמר כי הקבל פרק את מטענו. כשהקבל מסיים לפרוק את מטענו, המתח עליו הוא אפס, שהרי לפי הגדרת הקיבול – משוואה (10-1) – המתח U_{AB} על הקבל – נתון על-ידי

$$U_{AB} = \frac{Q}{C}$$

וכאשר $Q = 0$, גם $U_{AB} = 0$ (הקיבול C שונה מאפס).





א – קבל טעון

ב – נגד מחובר לקבל

איור 10-3

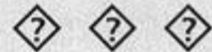
האם הקבל טעון?

בדרך-כלל, כשאנו רואים קבל, איננו יודעים אם הוא טעון או לא (כדי לענות על שאלה זו, נוכל למדוד את המתח על הקבל). אם-כן, הקבל שבו אנו נוגעים, עלול להיות קבל [redacted].



כזכור, גוף האדם מוליך חשמל, ולכן כשאנו נוגעים בקבל, עלול להתקבל מעגל סגור. במקרה כזה, הקבל עלול לפרוק את מטענו דרך גופנו, ואנו עלולים להרגיש במכת חשמל.

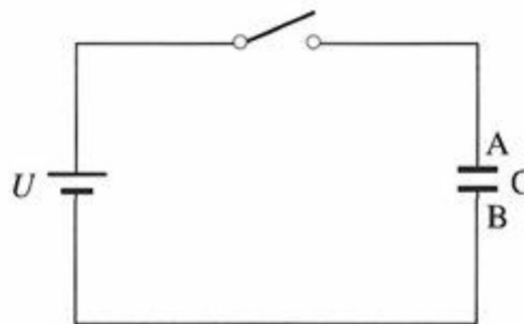
כדי למנוע פריקת קבל דרך גופנו, רצוי לפרוק את הקבל באמצעות נגד, כמתואר באיור 10-3ב, לפני שאנו משתמשים בקבל.

 **שאלות חזרה** 

שאלה 10-8

סמן את הביטוי הנכון מבין כל זוג ביטויים צמודים ומודגשים.

כשסוגרים את המתג במעגל שבאיור 10-4, נדחים אלקטרונים חופשיים מההדק **החיובי / השלילי** של הסוללה, אל הלוח **B / A** של הקבל. ואילו ההדק **החיובי / השלילי** של הסוללה – מושך אותו מספר אלקטרונים מהלוח **B / A** של הקבל.



איור 10-4

שאלה 10-9

א. הקבל במעגל שבאיור 10-4 – נטען על-ידי הסוללה. מה יהיה המתח על הקבל, כשהזרם במעגל ייפסק?

ב. סמן את קוטביות המתח על קבל זה.

שאלה 10-10

א. "כשקבל נטען, זורם זרם בין לוחות הקבל." נכון או לא?

[redacted] "כשקבל פורק את מטענו, זורם זרם בין לוחות הקבל". נכון או לא?



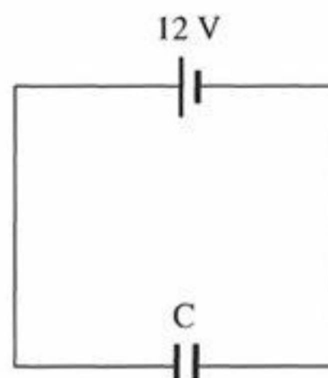
שאלה 10-11

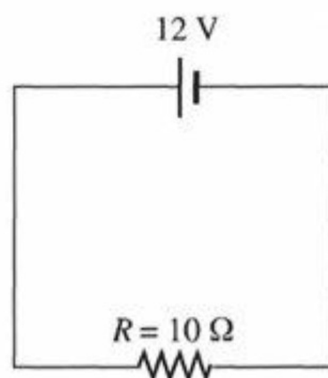
באיור 10-5א מחוברת סוללה לקבל, ובאיור 10-5ב מחוברת סוללה לנגד.

א. מהו המתח על הנגד?

ב. מהו המתח על הקבל, כשמסתיימת הטעינה שלו?

ג. סמן את קוטביות המתח על הקבל ועל הנגד.





א – סוללה מחוברת לקבל   ב – סוללה מחוברת לנגד

איור 10-5

שאלה 10-12

א. נתון קבל שקיבולו 20 μF. מהו מטען הקבל, אם המתח עליו הוא 220 V?

ב. פי כמה יגדל או יקטן מטען הקבל, אם המתח עליו יהיה 55 V?

ג. מהו קיבול הקבל, כשהמתח עליו 55 V?

10.3 הגורמים הקובעים את גודל הקיבול

למדנו כי לקבל לוחות יש קיבול. ולמדנו לחשב את הקיבול בעזרת המשוואה $C = \frac{Q}{U}$.

עכשיו נבדוק אילו תכונות של הקבל קובעות את קיבול הקבל. להלן שלוש התכונות העיקריות, הקובעות את הקיבול של קבל לוחות:

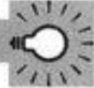
– שטח כל לוח
– המרחק בין הלוחות
– החומר שבין לוחות הקבל

השפעת שטח הלוחות על הקיבול

נניח כי נתונים כמה קבלים, הנבדלים זה מזה רק בשטח הלוחות שלהם. כלומר, המרחק בין הלוחות שווה בכל קבל, ובכולם נמצא אותו חומר בין הלוחות. במקרה זה, ניתן להראות כי

ככל ששטח הלוחות של קבל – גדול יותר, קיבול הקבל גדול יותר.

בניסויים מצאו כי קיבול הקבל נמצא ביחס ישר לשטח כל אחד מלוחות הקבל. למשל: אם מגדילים פי 2 את השטח של כל אחד מהלוחות, גם הקיבול גָּדֵל פי 2.



דוגמה 10-3

נתונים שני קבלים, קבל א וקבל ב, השונים זה מזה רק בשטח הלוחות: שטח כל לוח של קבל א, הוא 0.008 מטר רבוע (כלומר, $A_1 = 0.008\ \text{m}^2$); ואילו שטח כל לוח של קבל ב, הוא 0.002 מטר רבוע (כלומר, $A_2 = 0.002\ \text{m}^2$). נתון כי קיבול קבל ב הוא $C_2 = 5\ \text{nF}$. חשב את הקיבול C_1 של קבל א.

פתרון

שטח כל אחד מהלוחות של קבל א גדול פי 4 משטח כל אחד מלוחות קבל ב, כי

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{\text{שטח כל אחד מלוחות קבל א}}{\text{שטח כל אחד מלוחות קבל ב}} = \frac{0.008\ \text{m}^2}{0.002\ \text{m}^2} = 4$$

הקיבול נמצא ביחס ישר לשטח כל אחד מלוחות הקבל, ולכן יחס הקיבולים הוא כיחס השטחים, כלומר:

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{A_1}{A_2}$$

אם שטח כל לוח בקבל א גדול פי 4 משטח כל לוח בקבל ב, גם הקיבול של קבל א גדול פי 4 מהקיבול של קבל ב. הקיבול של קבל ב הוא $C_2 = 5\ \mu\text{F}$, ולכן הקיבול של קבל א הוא

$$C_1 = 4C_2 = 4 \times 5 = 20\ \mu\text{F}$$

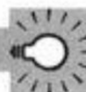


השפעת המרחק בין הלוחות על הקיבול

עתה נניח כי נתונים כמה קבלים, הנבדלים זה מזה רק במרחק שבין לוחותיהם. כלומר: אותו חומר נמצא בין לוחות הקבלים, ושטח הלוחות שווה בכל הקבלים. במקרה זה, ניתן להראות כי

ככל שהמרחק בין לוחות קבל גדול יותר – קיבול הקבל קטן יותר.

בניסויים מצאו כי **קיבול הקבל נמצא ביחס הפוך למרחק בין לוחות הקבל**. למשל: אם **מגדילים** פי 2 את המרחק בין לוחות קבל, קיבול הקבל קטן פי 2.



דוגמה 10-4

נתונים שני קבלים, שבין לוחותיהם נמצא אותו חומר. שטח הלוחות של קבל א שווה לשטח הלוחות של קבל ב. הקיבול של קבל א הוא 24 μF; והמרחק בין לוחותיו גדול פי 6 מהמרחק בין הלוחות של קבל ב. מה הקיבול של קבל ב?

פתרון

כאמור, הקיבול של קבל נמצא ביחס הפוך למרחק בין לוחות הקבל. נתון כי המרחק בין לוחות קבל א **גדול פי 6** מהמרחק בין לוחות קבל ב, ולכן הקיבול של קבל א **קטן פי 6** מהקיבול של קבל ב. במילים אחרות: הקיבול של קבל ב גדול פי 6 מהקיבול של קבל א.

קיבול קבל א הוא 24 μF, ולכן קיבול קבל ב הוא

$$24\ \mu F \times 6 = 144\ \mu F$$



השפעת החומר שבין לוחות הקבל על קיבול הקבל

ראינו שהקיבול C של קבל תלוי בשטח A של כל אחד מלוחות הקבל, ובמרחק d שבין לוחות הקבל. נרשום זאת בצורה מפורטת יותר: הקיבול של קבל נמצא ביחס ישר לשטח של כל אחד מלוחות הקבל, וביחס הפוך למרחק שבין הלוחות. כאשר בין לוחות הקבל אין שום חומר, מקבלים כי

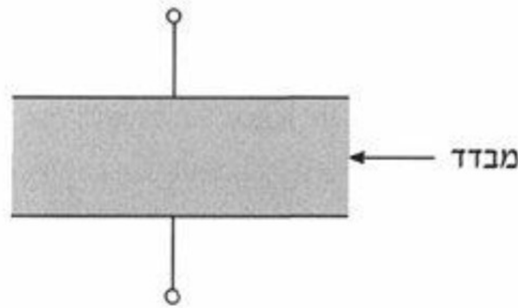
$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \qquad (10\text{-}2)$$

כאשר ϵ_0 קבוע. הגודל של קבוע זה הוא

$$\epsilon_0 = 8.85\times10^{-12}\ \frac{F}{m} = \frac{8.85}{10^{12}}\ \frac{F\ (\text{פאראד})}{m\ (\text{מטר})}$$

כאמור, קיבול הקבל נתון על-ידי המשוואה $C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$, רק כאשר בין לוחות הקבל אין שום חומר. במקרה זה אומרים כי בין לוחות הקבל נמצא **ריק**.

כאשר מכניסים מבדד בין לוחות הקבל (איור 10-6), מגלים כי קיבול הקבל **גָדֵל**. המבדד, שמכניסים בין לוחות קבל, נקרא לפעמים **דיאלקטרון** (וכן **דיאלקטריקון** או **חומר דיאלקטרי**).



איור 10-6 מבדד בין לוחות קבל

מובן כי הכנסת מבדד בין לוחות הקבל – לא שינתה את שטח הלוחות של הקבל ואת המרחק בין לוחות הקבל. נסיק מכאן כי במקום הקבוע $\in_0$ צריך להופיע קבוע אחר, התלוי בחומר שבין לוחות הקבל. קבוע זה מסומן על-ידי $\in$, והוא **נקרא הקבוע הדיאלקטרי של החומר**. ואילו $\in_0$ נקרא **הקבוע הדיאלקטרי של הריק**.

קיבול קבל, שבין לוחותיו נמצא מבדד, נתון על-ידי

$$C = \in \frac{A}{d} \qquad (10\text{-}3)$$

C – קיבול הקבל

$\in$ – קבוע דיאלקטרי

A – שטח כל לוח של הקבל

d – המרחק בין לוחות הקבל

נהוג לציין את הקבוע הדיאלקטרי $\in$ של חומר, ביחס לקבוע הדיאלקטרי של הריק. למשל: הקבוע הדיאלקטרי של נייר גדול פי 2.5 מהקבוע הדיאלקטרי של הריק. ליחס שבין הקבוע הדיאלקטרי $\in$ של חומר, לבין הקבוע הדיאלקטרי $\in_0$ של הריק, קוראים **קבוע דיאלקטרי יחסי**. הקבוע הדיאלקטרי היחסי מסומן על-ידי $\in_r$, והוא נתון אפוא על-ידי

$$\in_r = \frac{\in}{\in_0} \qquad (10\text{-}4)$$

כלומר,

$$\in = \in_r \in_0$$

$\in$ – קבוע דיאלקטרי

$\in_0$ – הקבוע הדיאלקטרי של הריק

$\in_r$ – קבוע דיאלקטרי יחסי

נסמן ב-C_0 את הקיבול של קבל, כאשר בין לוחותיו אין שום חומר, ונסמן ב-C את קיבול הקבל כאשר בין לוחות הקבל יש מבדד. נרשום את משוואת הקיבול עבור C_0 ועבור C:

$$C=\epsilon\frac{A}{d}=\epsilon_r\epsilon_0\frac{A}{d} \qquad C_0=\epsilon_0\frac{A}{d} \qquad (10\text{-}5)$$

נחלק את המשוואה השמאלית במשוואה הימנית, ונקבל כי

$$\epsilon_r=\frac{C}{C_0} \qquad (10\text{-}6)$$

כלומר, היחס $\frac{C}{C_0}$ (בין הקיבול C של קבל, שבין לוחותיו יש מבדד, לבין הקיבול C_0 של אותו קבל, כאשר בין לוחותיו אין שום חומר) שווה לקבוע הדיאלקטרי היחסי של חומר זה. בטבלה 10-1 רשומים הקבועים הדיאלקטריים היחסיים של חומרים דיאלקטריים שונים.

המבדד שמכניסים בין לוחות הקבל	הקבוע הדיאלקטרי היחסי ϵ_r של החומר
ריק	1
אוויר	1.0006
טפלון	2.1
נייר	2.5
גומי	3
נציץ (מיקה)	5
זכוכית	6
חרסינה	6
חומר קרמי מסוים	1,250

טבלה 10-2 הקבועים הדיאלקטריים היחסיים של חומרים דיאלקטריים שונים



דוגמה 10-5

א. המרחק בין לוחות קבל הוא 0.02 מילימטרים (כלומר, 2×10^{-5} מטרים), ושטח כל לוח של הקבל – 60 סנטימטרים רבועים (כלומר, 6×10^{-3} מטרים רבועים). בין לוחות הקבל אין שום חומר. מה קיבול הקבל?

ב. מכניסים נייר בין לוחות הקבל. חשב את קיבול הקבל במצב זה.

פתרון

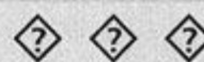
א. הקיבול C_0 של הקבל, הוא – לפי משוואה (10-2),

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d} = 8.85\times10^{-12}\times\frac{6\times10^{-3}}{2\times10^{-5}} = 0.002655\ \mu\text{F}$$

ב. לפי טבלה 10-1, הקבוע הדיאלקטרי של הנייר הוא $\epsilon_r = 2.5$. ולכן קיבול הקבל – שבין לוחותיו נמצא נייר - הוא, לפי משוואה (10-5),

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} = 2.5\times8.85\times10^{-12}\times\frac{6\times10^{-3}}{2\times10^{-5}} = 0.006638\ \mu\text{F}$$



 **שאלות חזרה** 

שאלה 10-13

התאם את הגדלים שמימין ליחידות שמשמאל:

א. מתח חשמלי — 1. מטען ליחידת זמן

ב. קיבול — 2. אנרגיה ליחידת מטען

ג. זרם — 3. היחס בין מטען למתח

ד. התנגדות — 4. היחס בין מתח לזרם

שאלה 10-14

ככל שמוליך ארוך יותר, התנגדותו ________ יותר. וככל שהמרחק בין לוחות קבל – גדול יותר, קיבול הקבל ________ יותר.

שאלה 10-15

המרחק בין לוחות קבל – הוא מילימטר אחד. מגדילים את המרחק בין הלוחות לשני מילימטר. כתוצאה מכך, קיבול הקבל ...

א. גָּדֵל פי 2   ב. קָטֵן פי 2   ג. אינו משתנה

שאלה 10-16

נתונים שני קבלים בעלי שטח לוחות שווה, ובשניהם יש טפלון בין הלוחות. המרחק בין הלוחות של קבל א – הוא מילימטר אחד; והמרחק בין הלוחות של קבל ב – הוא 5 מילימטר. קיבול קבל א – הוא 27 nF. מה הקיבול של קבל ב?

שאלה 10-17

חשב את הקבוע הדיאלקטרי של טפלון.

שאלה 10-18

המרחק בין לוחות קבל הוא 2 מילימטרים (כלומר, 0.002 מטר). שטח כל אחד מלוחות הקבל הוא 4 סמ"ר (כלומר, 0.0004 מ"ר). בין לוחות הקבל נמצאת חרסינה. מה קיבול הקבל?

שאלה 10-19

סמן את המילה הנכונה מבין כל זוג מילים צמודות ומודגשות.

הקיבול של קבל נמצא ביחס **ישר / הפוך** לקבוע הדיאלקטרי של החומר, שבין לוחות הקבל, ביחס **ישר / הפוך** לשטח כל אחד מלוחות הקבל, וביחס **ישר / הפוך** למרחק שבין לוחות הקבל.

10.4 חוזק דיאלקטרי ומתח פריצה

ראינו כי יש גבול למטען, שנוכל להניח על כל אחד מלוחות הקבל, לפני שהקבל ייפרץ. המתח המְרַבִּי, שניתן ליצור בין לוחות הקבל, בלי שהקבל ייפרץ, נקרא **מתח פריצה**. מתח הפריצה תלוי בשני גורמים:

- החומר הדיאלקטרי שבין לוחות הקבל.
- המרחק בין לוחות הקבל (כלומר, עובי החומר הדיאלקטרי שבין הלוחות).

ככל שמתח הפריצה גדול יותר, הכוח הפועל על יחידת מטען – גדול יותר. הכוח המְרַבִּי – ליחידת מטען - שבו החומר יכול להימצא, בלי להפוך למוליך, נקרא **החוזק הדיאלקטרי של החומר**. ניתן להראות כי מתח הפריצה של קבל נתון על-ידי מכפלת החוזק הדיאלקטרי - במרחק שבין לוחות הקבל.

יחידות החוזק הדיאלקטרי הן $\frac{\text{מתח}}{\text{מרחק}}$. לא נהוג למדוד את החוזק הדיאלקטרי ביחידות של וולט למטר, אלא, למשל, ביחידות של קילו-וולט (kV) לסנטימטר (cm), כפי שנתון בטבלה 10-2. בטבלה זו נתונים ערכים של החוזק הדיאלקטרי של חומרים דיאלקטריים שונים. חזרנו והבאנו כאן את הקבוע הדיאלקטרי היחסי של כל אחד מחומרים אלה.

החומר הדיאלקטרי	**החוזק הדיאלקטרי של החומר (ביחידות $\frac{kV}{cm}$)**	**הקבוע הדיאלקטרי היחסי של החומר**
אוויר	30	1.0006
חומר קרמי מסוים	30	1,250
חרסינה	80	6
נייר	200	2.5
טפלון	600	2.1
זכוכית	1,200	6
נציץ (מיקה)	2,000	5

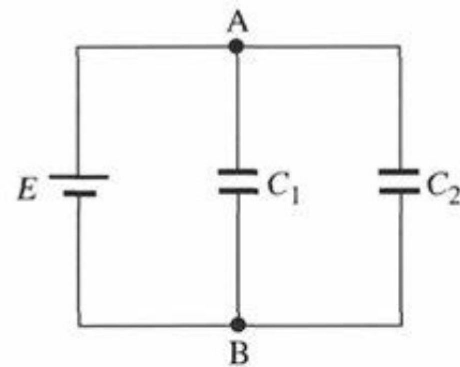
טבלה 10-2 החוזק הדיאלקטרי והקבוע הדיאלקטרי היחסי של חומרים שונים

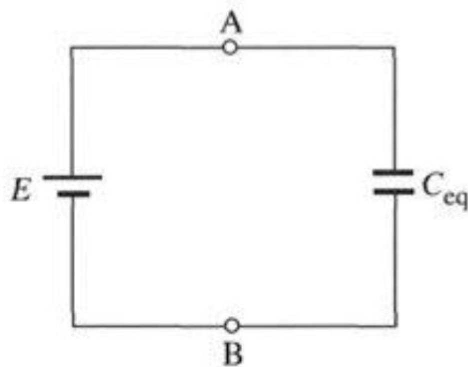
10.5 חיבור קבלים במקביל, בטור ובמעורב

כאשר עסקנו בנגדים, למדנו לזהות חיבורים שונים של נגדים: בטור, במקביל ובמעורב. כן למדנו לחשב את ההתנגדות השקולה של הנגדים בחיבורים אלה. הקיבול השקול של קבלים מוגדר בצורה דומה להתנגדות השקולה של נגדים, כלומר: הקבל השקול לקבוצת קבלים הוא קבל יחיד, שאם מחברים אותו במקום קבוצת הקבלים, הקיבול בין הנקודות המתאימות אינו משתנה.

חיבור קבלים במקביל

במעגל שבאיור 10-7א נתונים שני קבלים, C_1 ו-C_2, המחוברים במקביל למקור מתח E. קבלים אלה לא היו טעונים, לפני שחוברו במעגל.





א – שני קבלים במקביל   ב – הקבל השקול לשני הקבלים במקביל

איור 10-7 שני קבלים במקביל, והקבל השקול שלהם

נניח כי שני הקבלים, C_1 ו-C_2, שונים זה מזה רק בשטח הלוחות (כלומר, אותו חומר דיאלקטרי, בעל קבוע דיאלקטרי $\in$, נמצא בין לוחות הקבלים, והמרחק d בין הלוחות – שווה בשני הקבלים). שטח הלוחות של הקבל C_1 הוא A_1, וזה של הקבל C_2 – הוא A_2.

אם-כן, בין הנקודות A ו-B באיור 10-7א מתקבל קבל, ששטח כל אחד מהלוחות שלו הוא הסכום $(A_1 + A_2)$ של שטחי הלוחות של שני הקבלים, C_1 ו-C_2. קבל זה, C_{eq}, הוא הקבל השקול של שני קבלים אלה, והוא מתואר במעגל שבאיור 10-7ב.

שטח כל אחד מהלוחות של הקבל C_{eq}, הוא $A_1 + A_2$; המרחק בין לוחות הקבל הוא d; והקבוע הדיאלקטרי של החומר, שבין לוחות הקבל, הוא $\in$. מכאן שקיבול הקבל C_{eq} – נתון על-ידי

$$C_{eq} = \in \frac{A_1 + A_2}{d}$$

נרשום את הקיבול השקול בצורה מפורטת יותר:

$$C_{eq} = \underbrace{\in \frac{A_1}{d}}_{\text{קיבול הקבל } C_1} + \underbrace{\in \frac{A_2}{d}}_{\text{קיבול הקבל } C_2}$$


עמ' 323

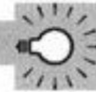
ומכאן נקבל כי

$$C_{eq} = C_1 + C_2$$

ניתן להראות כי הקיבול השקול של כל שני קבלים, המחוברים במקביל, שווה לסכום הקיבולים של שני הקבלים:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 \qquad (10\text{-}7)$$

הקיבול השקול של שני קבלים זהים $(C_1 = C_2 = C)$, המחוברים במקביל, הוא $C_{eq} = C_1 + C_2 = C + C = 2C$; והקיבול השקול של n קבלים זהים, המחוברים במקביל, הוא $C_{eq} = nC$ (כאשר הקיבול של כל אחד מהקבלים הזהים הוא C).



דוגמה 10-6

שני קבלים מחוברים במקביל. קיבול אחד הקבלים הוא 2 μF, וקיבול הקבל השני – 3 μF. מה הקיבול השקול של שני הקבלים?

פתרון

קיבול הקבל הראשון הוא $C_1 = 2\ \mu F$, וקיבול הקבל השני הוא $C_2 = 3\ \mu F$. כאמור במשוואה (10-7), הקיבול השקול C_{eq} של שני קבלים במקביל – שווה לסכום הקיבולים שלהם, ולכן

$$C_{eq} = C_1 + C_2 = 2\ \mu F + 3\ \mu F = 5\ \mu F$$

הקיבול השקול של שני הקבלים, המחוברים במקביל, הוא 5 μF.



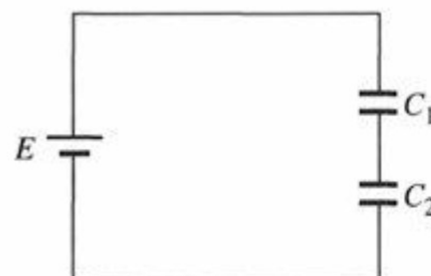
בצורה דומה אפשר למצוא גם את הקיבול השקול של כל מספר של קבלים, המחוברים במקביל. אם-כן,

הקיבול השקול של מספר כלשהו של קבלים, המחוברים במקביל, שווה לסכום הקיבולים שלהם.

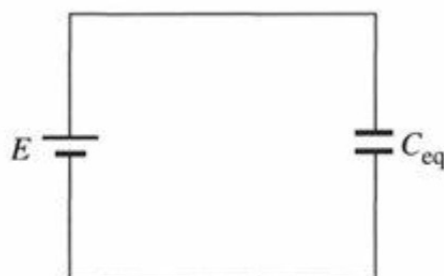
חיבור קבלים בטור

מחברים שני קבלים לא טעונים, C_1 ו-C_2, בטור למקור מתח E (איור 10-8א). נסמן על-ידי C_{eq} את הקבל השקול לשני קבלים אלה. קבל זה מופיע במעגל שבאיור 10-8ב.





א – שני קבלים בטור



ב – הקבל השקול לשני הקבלים בטור

איור 10-8 שני קבלים בטור, והקבל השקול שלהם

ניתן להראות כי הקיבול השקול C_{eq} של שני קבלים, C_1 ו-C_2, המחוברים בטור, נתון על-ידי

$$\frac{1}{C_{eq}}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2} \qquad (10\text{-}8)$$

כדי למצוא את הקיבול השקול של הקבלים בטור, נתבסס על העובדה הבאה: אם מחברים בטור קבלים, שלא היו טעונים לפני החיבור, הקבלים נטענים במטענים שווים. אם-כן, כל אחד מהקבלים שבאיור 10-8א, טעון במטען Q. לפי חוק המתחים של קירכהוף, נקבל כי מתח המקור E, במעגל שבאיור 10-8א, שווה לסכום המתחים על שני הקבלים, המחוברים בטור. נסמן על-ידי U_1 את המתח על הקבל C_1, ועל-ידי U_2 את המתח על הקבל C_2, ונקבל כי

$$E=U_1+U_2$$

כאמור, מטען כל אחד משני הקבלים, המחוברים בטור, הוא Q. מכאן נקבל:

$$U_2=\frac{Q}{C_2} \qquad U_1=\frac{Q}{C_1}$$

ומתח המקור במעגל שבאיור 10-8א, נתון על-ידי

$$E=U_1+U_2=\frac{Q}{C_1}+\frac{Q}{C_2}=Q\left[\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}\right] \qquad (10\text{-}9)$$

אנו רוצים לדעת את קיבול הקבל השקול של שני הקבלים, C_1 ו-C_2, המחוברים בטור. כלומר, אנו רוצים לדעת את הקיבול C_{eq} של קבל יחיד (איור 10-8ב), שאם נציב אותו במקום המערכת של שני קבלים אלה (איור 10-8א), המתח עליו יהיה שווה למתח המקור E; והמטען שלו Q יהיה שווה למטען Q, שהונח על-ידי מקור המתח על מערכת שני הקבלים, המחוברים בטור. כלומר,

$$C_{eq}=\frac{Q}{E}$$

ומכאן:

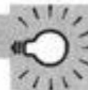
$$E=\frac{Q}{C_{eq}} \qquad (10\text{-}10)$$

לפי הגדרת הקיבול השקול, מתח המקור E – שווה בשני המעגלים שבאיור 10-8. ממשוואות (10-9) ו-(10-10), נקבל כי

$$\frac{Q}{C_{eq}}=Q\left[\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}\right]$$

נחלק ב-Q את שני האגפים של המשוואה האחרונה, ונקבל:

$$\frac{1}{C_{eq}}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}$$



דוגמה 10-7

במעגל חשמלי דרוש קיבול של 6 μF. ברשותך קבל שקיבולו 18 μF. מה קיבול הקבל, שעליך לחבר בטור לקבל שברשותך, כדי שהקיבול השקול של שני הקבלים, יהיה שווה לקיבול הדרוש?

פתרון

תחילה נרשום ביחידות פאראד – את הקיבולים הנתונים:

$$C_1 = 18\ \mu F = 18\times10^{-6}\ F\ ; \qquad C_{eq} = 6\ \mu F = 6\times10^{-6}\ F$$

נרשום את משוואת הקיבול השקול, משוואה (10-8):

$$\frac{1}{C_{eq}}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}$$

ומכאן נקבל כי

$$\frac{1}{C_2}=\frac{1}{C_{eq}}-\frac{1}{C_1}$$

נציב את הנתונים, ונקבל:

$$\frac{1}{C_2}=\frac{1}{6\times10^{-6}}-\frac{1}{18\times10^{-6}}=\frac{3-1}{18\times10^{-6}}=\frac{2}{18\times10^{-6}}$$

ומכאן:

$$C_2=\frac{18\times10^{-6}}{2}=9\ \mu F$$

מאחר שכל הקיבולים נתונים כאן באותה יחידה (μF), מותר לקצר את הרישום, ולרשום רק את המספרים ללא חזקות:

$$\frac{1}{C_2}=\frac{1}{6}-\frac{1}{18}=\frac{3-1}{18}=9\ \mu F$$

יש להוסיף קבל של 9 μF בטור לקבל של 18 μF, כדי שהקיבול השקול של שני קבלים אלה יהיה 6 μF.



בדומה למה שעשינו בהתנגדות השקולה של שני נגדים במקביל, נמצא עכשיו משוואה, שבאמצעותה נוכל לחשב מיד את הקיבול השקול של שני קבלים בטור, בלי שנצטרך לחשב תחילה את $\frac{1}{C_{eq}}$. לשם כך נרשום מכנה משותף במשוואת הקיבול השקול של שני קבלים בטור – משוואה (10-8):

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2}$$

ומכאן נקבל כי

$$C_{eq} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \qquad (10\text{-}11)$$

אם-כן, קיבלנו כי הקיבול השקול של שני קבלים בטור, שווה למכפלת הקיבולים - מחולקת בסכום הקיבולים.

בדרך שבה מוצאים את הקיבול השקול של שני קבלים, המחוברים בטור, ניתן למצוא גם את הקיבול השקול של כל מספר של קבלים, המחוברים בטור. למשל, הקיבול השקול C_{eq} של שלושה קבלים – C_1, C_2 ו-C_3 – המחוברים בטור, נתון על-ידי

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \qquad (10\text{-}12)$$

צורה זו של משוואת הקיבול השקול של קבלים בטור – היא הנוחה ביותר לחישוב הקיבול השקול, אף-על-פי שמחשבים תחילה את $\frac{1}{C_{eq}}$, ורק אחר-כך את הקיבול השקול C_{eq}. המשוואה, שבה מקבלים מיד את הקיבול השקול, היא מסובכת הרבה יותר.

אם שלושה קבלים זהים, $C_1 = C_2 = C_3 = C$ מחוברים בטור, הקיבול השקול שלהם נתון על-ידי

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C} = \frac{1}{C} = \frac{3}{C}$$

כלומר,

$$C_{eq} = \frac{C}{3}$$

והקיבול השקול של n קבלים זהים, שקיבול כל אחד מהם הוא C, נתון על-ידי

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{n}{C}$$

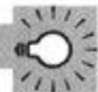
ומכאן:

$$C_{eq} = \frac{C}{n} \qquad (10\text{-}13)$$

חיבור קבלים במעורב

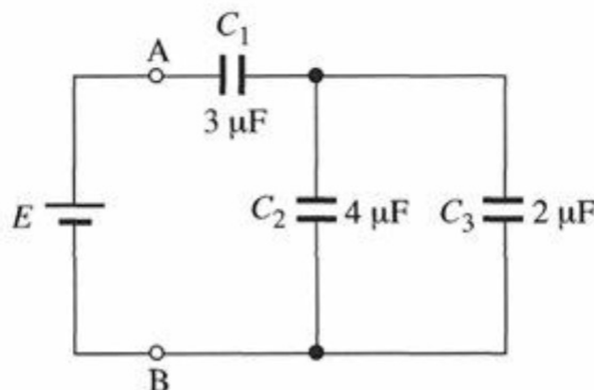
אם נתונים שלושה קבלים לפחות, אפשר לחבר אותם בצורות שונות, בדומה לאפשרויות החיבור של נגדים. כדי למצוא את הקיבול השקול של קבלים בחיבור מעורב, יש להשתמש במשוואות המתאימות של קיבול שקול בטור ובמקביל.

ובכן, מחפשים קבוצות של קבלים, המחוברים בטור, ומחליפים כל קבוצה – בקבל השקול שלה. כמו-כן מחפשים קבוצות של קבלים, המחוברים במקביל, ומחליפים גם כל קבוצה כזאת – בקבל השקול שלה. כך ממשיכים, עד שמחליפים את כל הקבלים בחיבור המעורב – בקבל שקול יחיד.



דוגמה 10-8

מהו הקיבול השקול, בין הנקודות A ו-B, של הקבלים שבאיור 10-9?



איור 10-9

פתרון

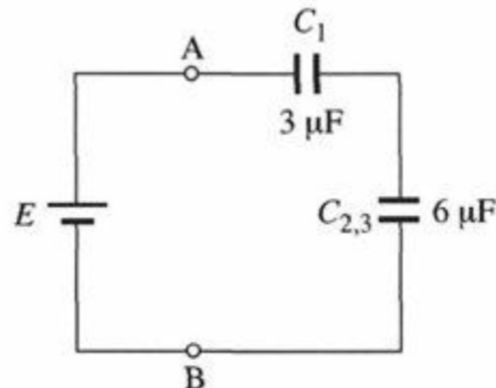
הקבלים C_2 ו-C_3 מחוברים במקביל. הקיבול השקול שלהם, $C_{2,3}$, נתון על-ידי

$$C_{2,3} = C_2 + C_3 = 4\ \mu\text{F} + 2\ \mu\text{F} = 6\ \mu\text{F}$$

הקבל השקול $C_{2,3}$ (איור 10-10) מחובר בטור לקבל C_1. הקיבול השקול שלהם, C_{eq}, נתון על-ידי

$$C_{eq} = \frac{C_1 C_{2,3}}{C_1 + C_{2,3}} = \frac{3\times10^{-6}\times6\times10^{-6}}{3\times10^{-6}+6\times10^{-6}} = 2\times10^{-6} = 2\ \mu\text{F}$$

הקיבול השקול של הקבלים, בין הנקודות A ו-B, הוא 2 μF.



איור 10-10

מאחר שכל הקיבולים נתונים באותה יחידה (μF), מותר לקצר את הרישום, ולרשום את המספרים ללא חזקות:

$$C_{eq} = \frac{3\times6}{3+6} = \frac{18}{9} = 2\ \mu\text{F}$$





פתרון

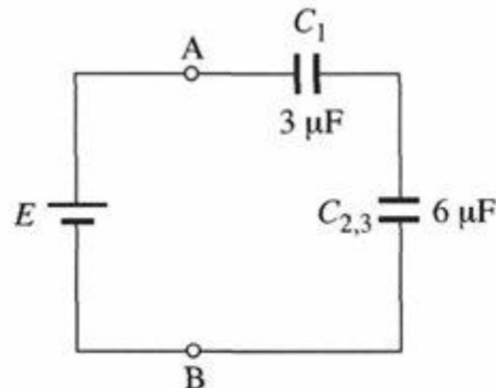
הקבלים C_2 ו-C_3 מחוברים במקביל. הקיבול השקול שלהם, $C_{2,3}$, נתון על-ידי

$$C_{2,3} = C_2 + C_3 = 4\ \mu F + 2\ \mu F = 6\ \mu F$$

הקבל השקול $C_{2,3}$ (איור 10-10) מחובר בטור לקבל C_1. הקיבול השקול שלהם, C_{eq}, נתון על-ידי

$$C_{eq} = \frac{C_1 C_{2,3}}{C_1 + C_{2,3}} = \frac{3\times10^{-6} \times 6\times10^{-6}}{3\times10^{-6} + 6\times10^{-6}} = 2\times10^{-6} = 2\ \mu F$$

הקיבול השקול של הקבלים, בין הנקודות A ו-B, הוא 2 μF.

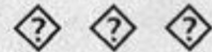


איור 10-10

מאחר שכל הקיבולים נתונים באותה יחידה (μF), מותר לקצר את הרישום, ולרשום את המספרים ללא חזקות:

$$C_{eq} = \frac{3\times6}{3+6} = \frac{18}{9} = 2\ \mu F$$





שאלות חזרה



שאלה 10-20

"כשקבלים מחוברים במקביל, מטעניהם שווים." נכון או לא?

שאלה 10-21

שני קבלים, C_1 ו-C_2, מחוברים במקביל. מה הקיבול השקול שלהם – C_{eq}? סמן את המשוואה הנכונה.

א. $C_{eq} = C_1 + C_2$

ב. $\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$

ג. $C_{eq} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$

ד. $C_{eq} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$

שאלה 10-22

א. שני קבלים זהים מחוברים במקביל. הקיבול השקול שלהם הוא $20\ \mu F$. מה הקיבול של כל אחד מהקבלים?

ב. חזור על הסעיף הקודם, אלא שהקבלים מחוברים בטור.

שאלה 10-23

כשקבלים מחוברים בטור ...

א. מטעניהם שווים ב. המתחים עליהם שווים ג. קיבוליהם שווים.

שאלה 10-24

הקיבול השקול של שני קבלים – $2\ \mu F$. קיבול אחד משני הקבלים – $3\ \mu F$.

א. האם הקבלים מחוברים בטור או במקביל? נמק.

ב. חשב את קיבול הקבל השני.

שאלה 10-25

שלושה קבלים זהים מחוברים בטור. קיבול כל קבל – 12 μF. מה הקיבול השקול של הקבלים?

שאלה 10-26

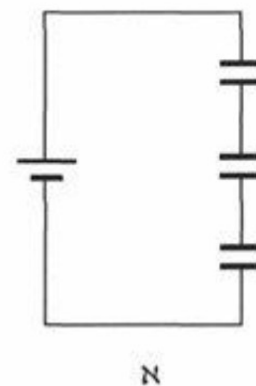
הקיבול השקול של עשרה קבלים הוא 100 μF.

א. מהו הקיבול של כל קבל, אם הקבלים מחוברים בטור?

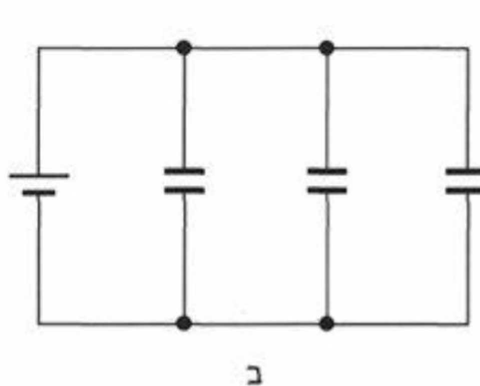
ב. מהו הקיבול של כל קבל, אם הקבלים מחוברים במקביל?

שאלה 10-27

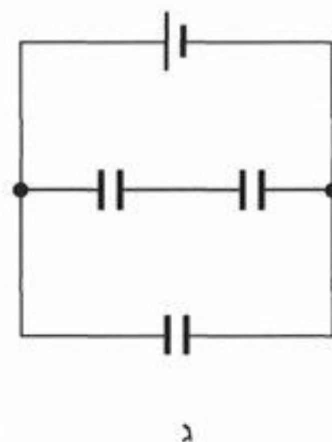
חשב את הקיבול השקול של הקבלים בכל אחד מהמעגלים שבאיור 10-11, אם נתון כי קיבול כל קבל – 6 μF.



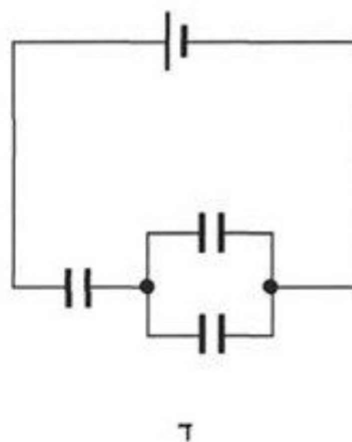
א



ב



ג

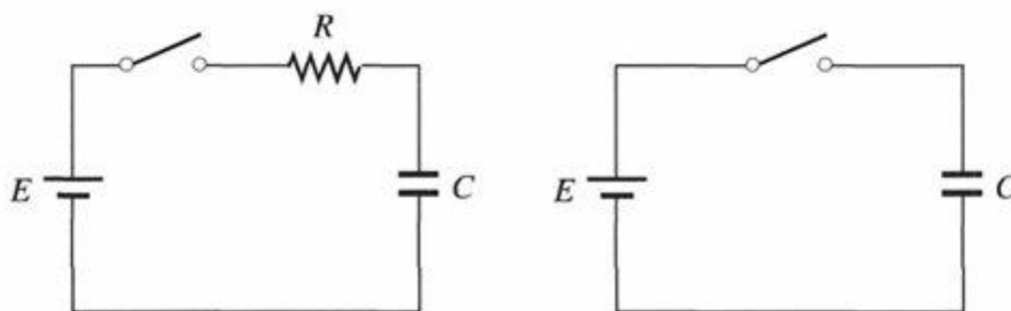


ד

איור 10-11

10.6 טעינה ופריקה של קבל

ראינו כי שיטה מעשית ומיידית לטעינת קבל – היא חיבור הקבל למקור מתח. חיבור כזה מתואר במעגל שבאיור 10-12א. נניח כי לפני סגירת המתג – הקבל לא היה טעון, כלומר: המתח על הקבל היה אפס.



א – קבל מחובר להדקי מקור מתח   ב – הנגד R מגן על מקור המתח

איור 10-12 טעינת קבל על-ידי מקור מתח

עם סגירת המתג במעגל, מתחיל לזרום זרם במעגל. ניווכח מיד כי כדי להגן על המקור, מוסיפים נגד למעגל, כמתואר באיור 10-12ב. מעגל כזה נקרא **מעגל RC טורי**.

חיבור קבל למקור מתח

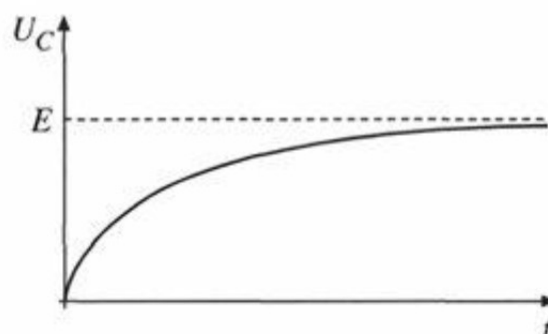
כשמחברים קבל למקור מתח, נטענים לוחות הקבל, עד שהמתח על הקבל משתווה למתח המקור. תהליך זה נמשך אמנם זמן קצר, אך מאחר שהתנגדות התֵיִלִים (וכן ההתנגדות הפנימית של המקור) קטנה מאוד, הרי שבמשך זמן קצר זה – זורם במעגל זרם גדול מאוד (עד כדי אלפי אמפרים).

מובן שזרם זה זורם גם במקור, וכתוצאה מכך – פעולת המקור עלולה להיפגע. כדי למנוע פגיעה כזאת, נהוג להוסיף נגד למעגל, כך שמתקבל מעגל RC טורי (איור 10-12ב). נגד זה גורם לכך, שקצב הטעינה של הקבל – קטן יותר, והזרם ההתחלתי במעגל - קטן במידה רבה.

לאחר סגירת המתג במעגל שבאיור 10-12ב, זורם במעגל זרם במשך זמן מסוים. הקבל נטען, עד שהמתח עליו משתווה למתח המקור. מרגע זה אין הפרש מתח בין לוחות הקבל לבין הדקי המקור. בהתאם לחוק אום, לא יזרום זרם במעגל.

המתח על קבל הנטען במעגל RC טורי

באיור 10-13 נתון הגרף של המתח על הקבל בתלות בזמן. ניתן להראות כי המתח על הקבל הולך וגָדֵל בכל רגע ורגע; אך ככל שהזמן עובר, המתח גָדֵל בשיעור קטן יותר.

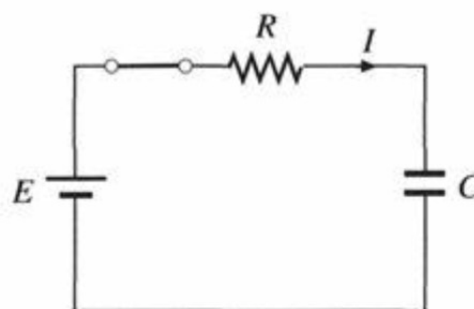


איור 10-13 המתח על קבל נטען – בתלות בזמן

המתח על הנגד במעגל RC טורי

מטעמי נוחות חזרנו והבאנו מעגל RC טורי (איור 10-14). אם נדע את המתח U_C על הקבל במעגל זה ברגע מסוים, נוכל לדעת גם את המתח על הנגד באותו רגע. לשם כך, נשתמש בחוק המתחים של קירכהוף. המתח U_R על הנגד במעגל זה נתון – בכל רגע ורגע – על-ידי

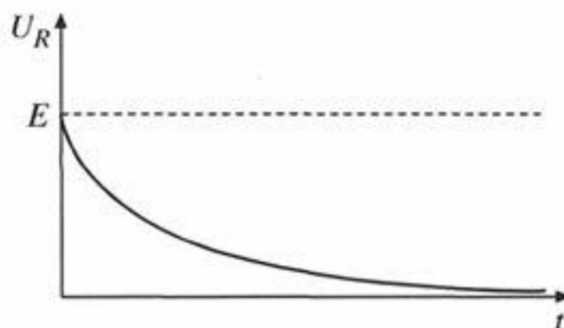
$$U_R = E - U_C$$



איור 10-14 מעגל RC טורי

כאשר נציב במשוואה זו את הערך הקבוע E ואת הערך U_C ברגע מסוים, נקבל את הערך U_R באותו רגע.

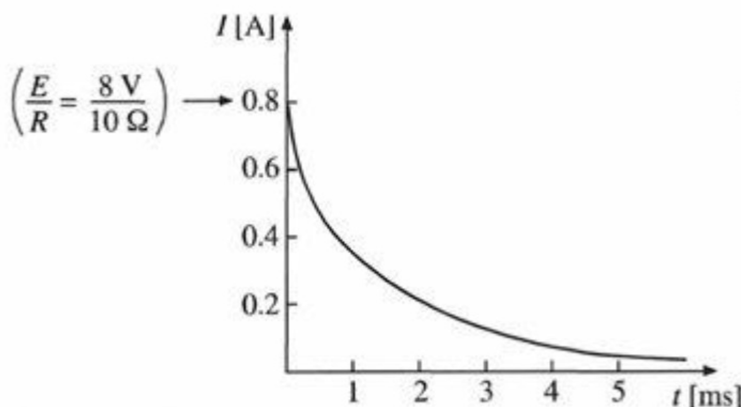
נחזור על תהליך זה לגבי רגעים נוספים, ונקבל בצורה זו את הגרף שבאיור 10-15. גרף זה מתאר את תלות U_R בזמן.

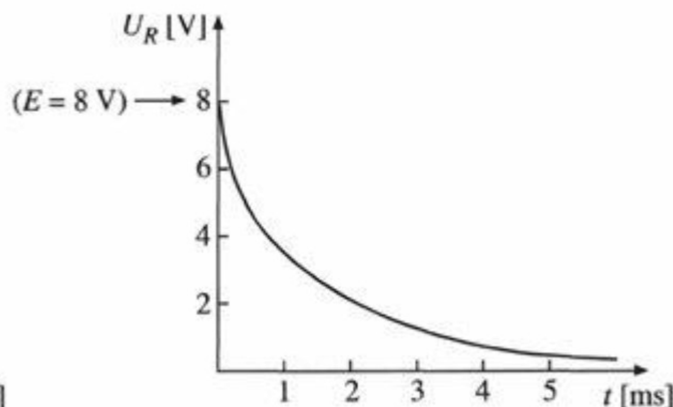


איור 10-15 המתח על הנגד בתלות בזמן – במעגל RC טורי

הזרם בנגד במעגל RC טורי

הזרם I בנגד שבמעגל RC טורי, כדוגמת זה שבאיור 10-14, הוא הזרם במעגל כולו. אם נתון המתח U_R על נגד – בתלות בזמן – ניתן לקבל את התלות בזמן של הזרם, אם משתמשים בחוק אום $\left(I=\frac{U_R}{R}\right)$. הגרף של הזרם בנגד בתלות בזמן – מתואר באיור 10-16ב. לשם השוואה הבאנו גם את גרף המתח על הנגד בתלות בזמן (איור 10-16א), כשנתון כי הכא״מ הוא 8 V והתנגדות הנגד היא 10 Ω.





א – המתח על הנגד

ב – הזרם בנגד

איור 10-16 המתח והזרם בנגד – בתלות בזמן – במעגל RC טורי

קבוע הזמן במעגל RC טורי

הבאנו כמה גרפים המאפיינים מעגל RC טורי: המתח U_C על קבל נטען בתלות בזמן (איור 10-13). המתח U_R על הנגד בתלות בזמן (איור 10-15), והזרם I בנגד בתלות בזמן (איור 10-16ב). הקצב, שבו משתנים גדלים אלה, נקבע על-ידי ערכי הרכיבים במעגל – R ו-C. ניתן לבטא את קצב השינוי באמצעות מאפיין חשוב של מעגל RC טורי.

מאפיין זה נקרא **קבוע הזמן** של המעגל, והוא נמדד ביחידות זמן. קבוע הזמן מסומן באות היוונית τ (טָאוּ), והוא מוגדר כפרק הזמן העובר מרגע התחלת הטעינה, ועד שהמתח על הקבל מגיע ל-63.2% (כלומר, ל-0.632) מהערך הסופי. קבוע הזמן נתון על-ידי מכפלת ההתנגדות R בקיבול C של המעגל:

$$\tau = RC \qquad (10\text{-}14)$$

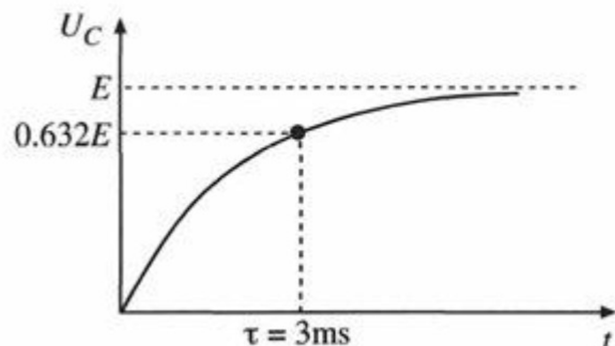
τ – קבוע הזמן

R – התנגדות

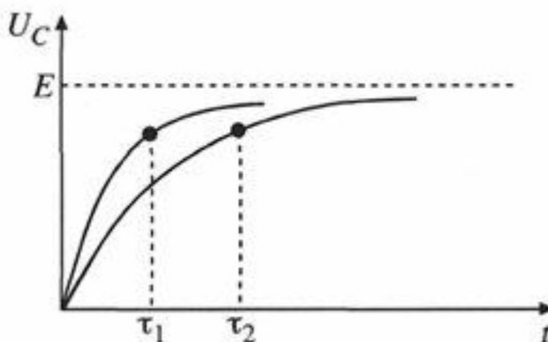
C – קיבול

למשל, במעגל שבו $\tau = 3\text{ ms}$, התלות של U_C בזמן וערך מתח הקבל ברגע $t = \tau = 3\text{ ms}$, מתוארים באיור 10-17.

אם קבוע הזמן קטן יותר, אז קצב שינוי המתח יהיה גדול יותר, כפי שניתן לראות באיור 10-18. באיור זה נתונים שני גרפים, המתארים את התלות של U_C בזמן בשני מעגלים שונים: קבוע הזמן $\tau_1 = R_1C_1$ של מעגל אחד קטן יותר מאשר קבוע הזמן $\tau_2 = R_2C_2$ של המעגל השני.



איור 10-17



איור 10-18 המתח על קבל בתלות בזמן, עבור שני ערכים שונים של קבוע הזמן t
τ_1 קטן יותר מ-τ_2

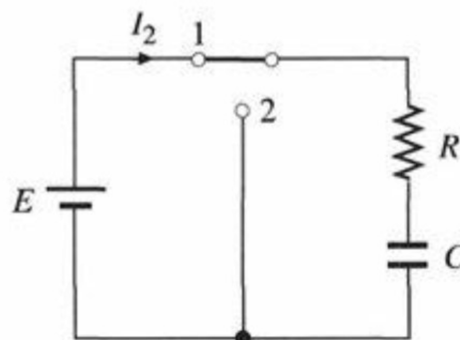
כאמור, טעינת הקבל נמשכת, עד שהמתח על הקבל שווה, למעשה, למתח המקור. אם-כן, מתח המקור הוא הערך הסופי של המתח על הקבל. כעבור פרק זמן של 5τ מרגע התחלת הטעינה, המתח על הקבל מגיע ל-99.3% (כלומר, ל-0.993) ממתח המקור. ערך זה נחשב, למעשה, לערך הסופי של המתח על הקבל. נהוג לומר כי כעבור 5τ מרגע התחלת הטעינה – מסתיימת תקופת המעבר של מעגל RC טורי. באיור **10-19** מסומן הרגע 5τ (ורגעים נוספים) בגרף של המתח על קבל נטען. הערכים המתאימים רשומים בטבלה שליד הגרף.

הזמן	**המתח על הקבל (ביחס לערך הסופי)**	
τ	63.2%	(0.632)
2τ	86.5%	(0.865)
3τ	95.3%	(0.953)
4τ	98.2%	(0.982)
5τ	99.3%	(0.993)

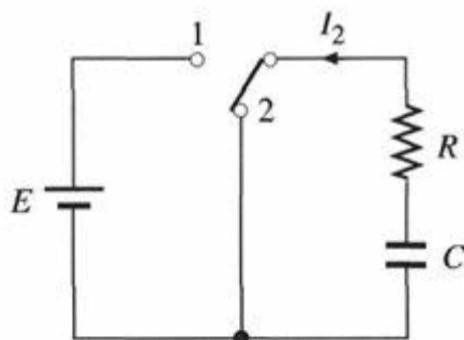
איור 10-19 המתח – בתלות בזמן – על קבל נטען

מתחים וזרמים בפריקת קבל

באיור 10-20א נתון מעגל טורי. למתג במעגל יש שני מצבים. המתג נמצא זמן מסוים במצב 1, ואז מעבירים את המתג למצב 2 (איור 10-20ב). כשהמתג נמצא במצב 1, הקבל נטען, ובנגד זורם זרם טעינה I_1, שהתלות שלו בזמן היא כמתואר באיור **10-16ב**.



א – המתג במצב 1 : הקבל נטען

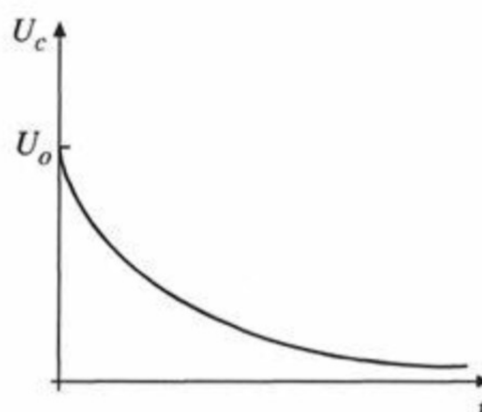


ב – המתג במצב 2 : הקבל פורק את מטענו

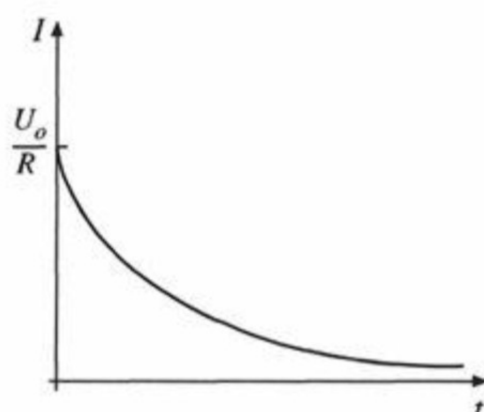
איור 10-20 שינוי מצב המתג במעגל RC טורי

לאחר שהמתח על הקבל מגיע לערך מסוים U_o (שאינו חייב להיות הערך הסופי), מעבירים את המתג למצב 2. כשהמתג עובר למצב 2, הקבל מתחיל לפרוק את מטענו. בנגד זורם זרם פריקה I_2, עד שהקבל פורק לגמרי את מטענו. אבל אנו רואים כי במעגל הסגור שבאיור 10-20ב – לא מחובר מקור מתח. אם-כן, מאין הזרם במעגל זה? במעגל זה – הקבל פועל כמקור מתח, וגורם לזרם בנגד.

באיור 10-21א מתוארת התלות בזמן של המתח U_C על הקבל, הפורק את מטענו. ניתן להראות כי המתח על הקבל הולך וקָטֵן בכל רגע ורגע; אך ככל שהזמן עובר, המתח קָטֵן בשיעור קטן יותר.



א – מתח הפריקה של קבל – בתלות בזמן



ב – הזרם במעגל – בתלות בזמן

איור 10-21 מתח הפריקה של הקבל והזרם במעגל RC טורי בתלות בזמן

לפי חוק המתחים של קירכהוף לגבי המעגל שבאיור 10-20ב, המתח U_R על הנגד שווה בגודלו למתח על הקבל. מכאן שהגרף שבאיור 10-21א מתאר גם את התלות בזמן של המתח על הנגד.

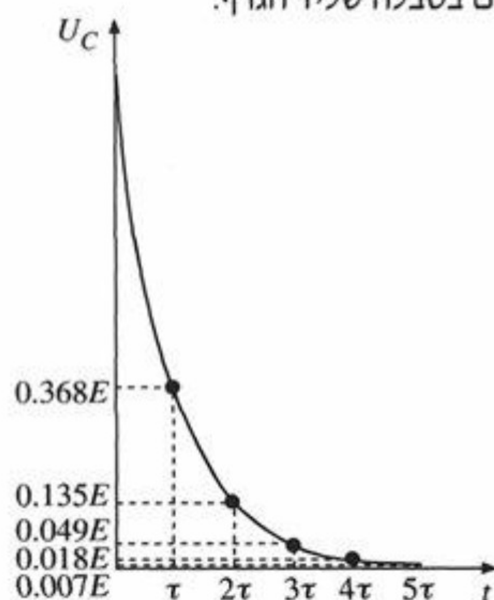
כאמור, אם נתון המתח על הנגד - בתלות בזמן, ניתן לקבל את התלות בזמן של הזרם, אם משתמשים בחוק אום. הגרף של הזרם בנגד בתלות בזמן – מתואר באיור 10-21ב.

קבוע הזמן בפריקת קבל

הגדרנו כבר את קבוע הזמן במעגל RC טורי. זהו קבוע הזמן, כשהקבל נטען. גם לגבי קבל, הפורק את מטענו, נהוג להגדיר קבוע זמן. גם קבוע זמן זה מסומן באות τ, וגם הוא נתון על-ידי $\tau = RC$.

קבוע זמן זה מציין את פרק הזמן, שבו המתח על הקבל קָטֵן ל-36.8% (כלומר, ל-0.368) מהערך שהיה לו בתחילת הפריקה. כעבור פרק זמן של $5t$ מרגע התחלת הפריקה, מתח הפריקה של הקבל מגיע ל-0.7% (כלומר, ל-0.007) מהערך ההתחלתי של מתח זה, ואומרים כי משך הפריקה הוא 5τ. באיור 10-22 מסומן הרגע 5τ (ורגעים נוספים) בגרף של המתח על קבל הפורק את מטענו. הערכים המתאימים רשומים בטבלה שליד הגרף.

הזמן	המתח על הקבל (ביחס לערך הסופי)	
τ	36.8%	(0.638)
2τ	13.5%	(0.135)
3τ	4.9%	(0.049)
4τ	1.8%	(0.018)
5τ	0.7%	(0.007)

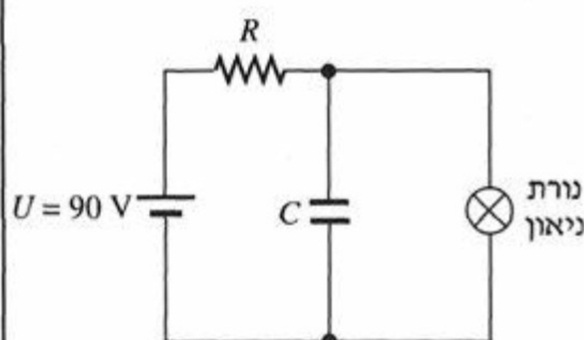


איור 10-22 התלות בזמן של מתח פריקה של קבל

נורת ניאון מנצנצת

למעגל RC יש שימושים רבים. דוגמה פשוטה נתונה במעגל המתואר באיור 10-23. מעגל זה כולל נורת ניאון, קבל ונגד המחוברים למקור מתח.

כל עוד המתח על נורת הניאון קטן ממתח מסוים – הנקרא מתח ההצתה – נשארת הנורה כבויה. כשהמתח על הנורה שווה למתח ההצתה, הנורה מאירה.



איור 10-23

הקבל C נטען במעגל דרך הנגד R. כאשר המתח על הקבל מגיע למתח ההצתה, נורת הניאון מאירה, כי היא מחוברת במקביל לקבל, והמתח עליה שווה למתח על הקבל.

כשהנורה מאירה, התנגדותה קְטַנָּה, והקבל פורק במהירות את מטענו דרך הנורה. המתח על הקבל – ועל הנורה – הולך וקָטֵן, עד שהוא יורד אל מתחת למתח ההצתה של הנורה, והנורה מפסיקה להאיר.

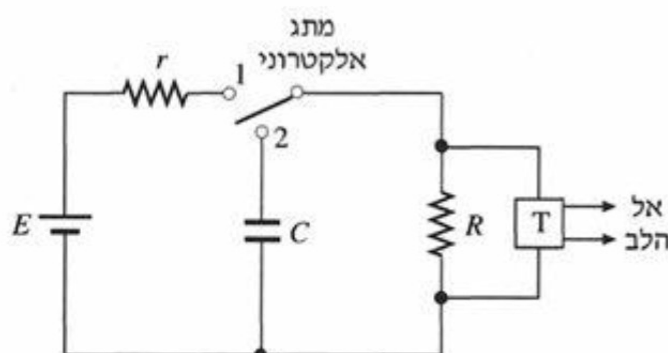
הקבל נטען שוב, עד שהמתח עליו מגיע למתח ההצתה, והתהליך חוזר על עצמו, כך שמתקבלת נורה מנצנצת. קצב הנצנוצים ניתן לשינוי – הן על-ידי שינוי ההתנגדות R והן על-ידי שינוי הקיבול C.

האם קבוע הזמן של הטעינה, אינו חייב להיות שווה לקבוע הזמן של הפריקה?

כדי לענות על שאלה זו, נחזור ונתבונן במעגלים שבאיור 10-20. כשהמתג במעגל זה נמצא במצב 1 (איור 10-20א) הקבל נטען; וכשהמתג עובר למצב 2 (איור 10-20ב), הקבל פורק את מטענו. RC, קבוע הזמן של הטעינה, שווה במקרה זה לקבוע הזמן של הפריקה, אך לא תמיד הדבר כך, כפי שניווכח מיד.

קוצב לב

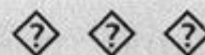
קוצב לב הוא התקן קטן, ששמים בבית החזה של חולי לב מסוימים. קוצב הלב שולח אותות חשמליים סדירים, כדי לווסת את פעימות הלב של החולה. בקוצב לב משתמשים בקבל, ומנצלים את האפשרות לקבל ערכים שונים של קבוע זמן – בטעינה ובפריקה של קבל. המעגל הבסיסי של קוצב לב מתואר באיור 10-24.



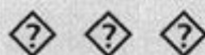
איור 10-24 מעגל בסיסי של קוצב לב

הקבל נטען במהירות דרך ההתנגדות הקטנה r (קבוע הזמן של הטעינה הוא $\tau_1 = rC$). כעבור זמן מסוים, המתג האלקטרוני עובר ממצב 1 למצב 2, ואז הקבל מתחיל לפרוק באיטיות את מטענו - דרך ההתנגדות הגדולה R (קבוע הזמן של הפריקה הוא $\tau_2 = RC$).

בכל פעם שהמתח על הנגד R מגיע לערך שנקבע מראש, המעגל החשמלי המיוחד T – שולח אות חשמלי ללב.



שאלות חזרה



שאלה 10-28

"כשהמתח על הקבל במעגל RC טורי שווה למתח המקור, המתח על הנגד הוא אפס, ולא זורם זרם בנגד ובמעגל בכלל." נכון או לא"?

שאלה 10-29

מודדים את המתח על קבל, הנטען במעגל RC טורי.

סמן את כל הטענות הנכונות, לגבי מתח זה.

א. המתח גָדֵל בכל רגע ורגע.

ב. המתח קָטֵן בכל רגע ורגע.

ג. המתח קבוע.

ד. ככל שהזמן עובר, המתח גָדֵל בשיעור קטן יותר.

ה. ככל שהזמן עובר, המתח גָדֵל בשיעור גדול יותר.

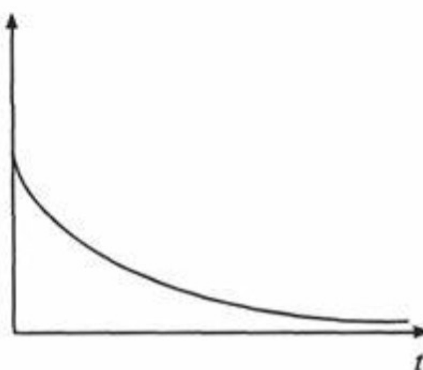
שאלה 10-30

באיור 10-25 מתוארת התלות בזמן של גודל מסוים במעגל RC טורי, שבו הקבל נטען. גודל זה יכול להיות ... (סמן את כל האפשרויות הנכונות):

א. המתח על הקבל

ב. המתח על הנגד

ג. הזרם במעגל



איור 10-25

שאלה 10-31

מתח המקור במעגל RC טורי הוא 12 V, והתנגדות הנגד היא 50 Ω. בטבלה הבאה רשומים ערכים של המתח על הקבל, המתח על הנגד והזרם במעגל - ברגעים שונים. השלם את הטבלה.

המתח על הקבל (ביחידות וולט)			12	
המתח על הנגד (ביחידות וולט)	4			
הזרם במעגל (ביחידות אמפר)		0.16		0.2

שאלה 10-32

התנגדות הנגד במעגל RC טורי – 16 Ω ; קיבול הקבל – 5 μF. מה קבוע הזמן של המעגל?

שאלה 10-33

קבוע הזמן של מעגל RC טורי הוא 8 ms.

א. מה יהיה קבוע הזמן של המעגל, אם נגדיל פי 5 את התנגדות הנגד?

ב. מגדילים את קיבול הקבל פי 5, ומחזירים את התנגדות הנגד לקדמותה. מה יהיה עכשיו קבוע הזמן של המעגל?

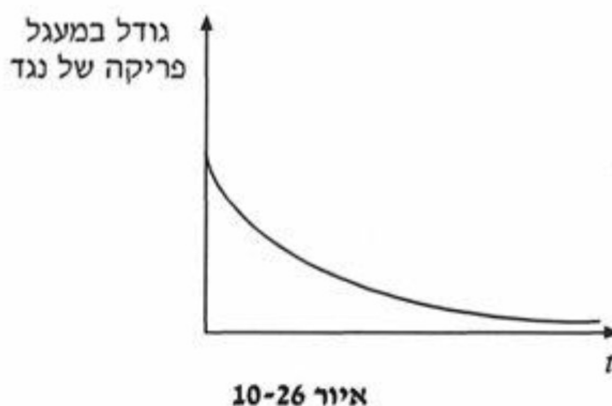
ג. מה יהיה קבוע הזמן של המעגל, אם התנגדות הנגד תהיה גדולה פי 5 מאשר בהתחלה, וקיבול הקבל יהיה קטן פי 5 מאשר בהתחלה?

שאלה 10-34

קבל פורק את מטענו דרך נגד, ושום מקור מתח אינו מחובר לרכיבים אלה. האם במקרה כזה יכול לזרום זרם בנגד? נמק.

שאלה 10-35

"באיור 10-26 מתוארת התלות בזמן של גודל מסוים במעגל פריקה של קבל. גודל זה יכול להיות כל אחד מהגדלים הבאים: המתח על הקבל; המתח על הנגד; הזרם במעגל." נכון או לא?



איור 10-26

סיכום פרק 10

- הקיבול C של מוליך הוא המטען Q, שֶׁיֵש להניח על המוליך, כדי להעלות את הפוטנציאל U של המוליך בוולט אחד: $C = \frac{Q}{U}$.
- קבל הוא מערכת קיבול, הנבנית לצורך אגירת מטען. קבל לוחות הוא הקבל הפשוט ביותר. קבל זה מורכב משני לוחות מתכת מקבילים וסמוכים, הטעונים במטענים מנוגדים (Q, $-Q$). הקיבול של קבל לוחות נתון על-ידי היחס בין גודל המטען Q לבין הפרש הפוטנציאלים בין הלוחות. שיטה מעשית ומִיָדית לטעינת קבל – היא באמצעות מקור מתח.
- בין לוחות הקבל (הרחק מן הקצוות) שורר, בקירוב רב, שדה חשמלי אחיד E. הקשר בין המתח U שבין לוחות הקבל – לבין השדה החשמלי: $U = Ed$, כאשר d הוא המרחק בין לוחות הקבל.
- קיבול קבל לוחות נתון על-ידי $C = \varepsilon \frac{A}{d}$, כאשר A הוא שטח כל אחד מלוחות הקבל; ε הוא הקבוע הדיאלקטרי של החומר, הנמצא בין לוחות הקבל.
- דיאלקטרון הוא חומר מבודד, המוכנס בין לוחות קבל.
- קבוע הזמן τ של הטעינה במעגל RC טורי – נתון על-ידי $\tau = RC$. ל-τ יש יחידות של זמן. משך תקופת המעבר הוא 5τ. גם קבוע הזמן של הפריקה הוא RC. גם תקופת המעבר של הפריקה – נמשכת 5τ, להתנגדות הפריקה יכול להיות ערך שונה מאשר להתנגדות הטעינה.

11

תופעות הנובעות ממטענים נעים

11.1 שדה מגנטי

התופעה המגנטית, בדומה לתופעה החשמלית, נתגלתה על-ידי היוונים הקדמונים. הם גילו כי יש אבנים מסוג מסוים, שאם מקרבים אותן אל פיסות ברזל קטנות, פיסות הברזל נמשכות אל האבנים. נראה כי אבנים כאלו נתגלו לראשונה בעיר מגנסיה שבטורקיה, ולכן הן נקראות מגנטים; ותכונת המשיכה על-ידי מגנט נקראת מגנטיות.

השימוש במחט מגנטית (מחט מצפן) למציאת כיוונים

לתופעה המגנטית נמצא שימוש רב-ערך, כבר לפני שנים רבות. התקן המבוסס על התופעה המגנטית הוא המצפן, המוכר לכולנו, והוא מתואר באיור 11-1.



א – תיאור עקרוני של מצפן



ב – מצפן טיפוסי

איור 11-1 מצפנים



המצפן בנוי ממוט מגנטי דק (הנקרא **מחט מגנטית**) הנמצא על ציר, כך שהמוט חופשי להסתובב סביב הציר. כפי שידוע לכולנו, מחט המצפן נעצרת תמיד כך, שצד אחד שלה מצביע לכיוון צפון (בקירוב), והצד האחר מצביע לכיוון דרום (בקירוב). כך אפשר למצוא כיוונים בעזרת המצפן. פעם (ולפעמים גם היום) שימש המצפן למציאת כיוונים בעת מסעות בים וביבשה.

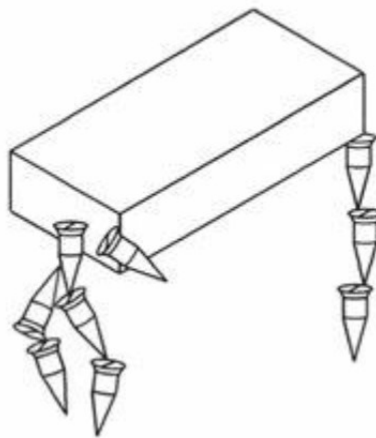
דרכים שונות למגנוט ברזל

כתוצאה מהחשיבות המעשית של תופעת המגנטיות, נערכו ניסויים רבים ושונים, כדי להתעמק בתופעה זו, וכבר לפני שנים רבות הצליחו לייצר מגנטים מלאכותיים: הניחו מוט ברזל בכיוון צפון-דרום, והיכו בו בפטיש, ומוט הברזל הפך למגנט. הדבר מתואר באיור 11-2, שנלקח מספר בן ארבע מאות שנה. מסתבר כי התהליך יעיל יותר, אם משתמשים במוט ברזל מלובן.



איור 11-2 ייצור מגנט מלאכותי: מוט הברזל נמצא בכיוון צפון-דרום, ומכים בו בפטיש

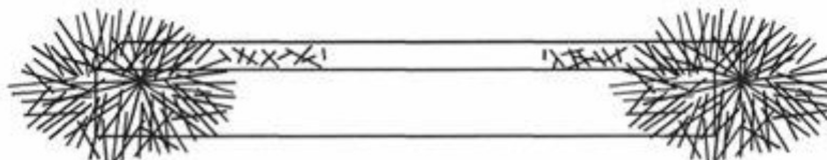
הנה דרך אחרת למגנוט ברזל: אם משפשפים מוט ברזל על-ידי מוט מגנטי, מוט הברזל הופך גם הוא למגנט. אפשר אפילו ליצור מגנטים "בשרשרת": ממגנטים מסמר (או סיכה) העשוי מברזל, והמסמר נדבק למגנט. עכשיו מקרבים עוד מסמר, וגם מסמר זה מתמגנט ונדבק למסמר הראשון. כך אפשר לקבל "שרשרת" של מסמרים ממוגנטים, כפי שרואים באיור 11-3.



איור 11-3 ״שרשרת״ של מסמרים ממוגנטים

קטבים מגנטיים

גם נסורת ברזל נדבקת למגנט. אם מכניסים מגנט לתוך נסורת ברזל, ואחר-כך מוציאים את המגנט, רואים כי כמויות גדולות של נסורת דבוקות בקצות המגנט, וכמעט שאין נסורת באמצע המגנט. מצב זה מתואר באיור 11-4.



איור 11-4 נסורת ברזל דבוקה למגנט

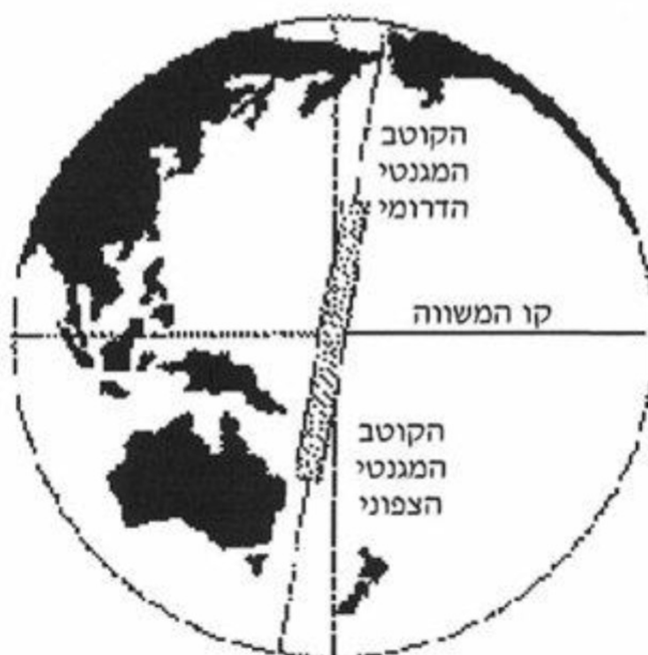
ניתן להסיק כי תכונת המשיכה של המגנט (ובקיצור: המגנטיות) חזקה בקצות המגנט, ונחלשת לקראת אמצע המגנט. קצות המגנט, שבהם המגנטיות חזקה, נקראים **קטבים מגנטיים**. קוטב אחד נקרא הקוטב הצפוני של המגנט, ומסומן על-ידי N; והקוטב השני נקרא הקוטב הדרומי של המגנט, ומסומן על-ידי S.

מקור השמות **קוטב צפוני וקוטב דרומי** במחט המגנטית של המצפן: כשמחט המצפן נעצרת, הקוטב הצפוני שלה – N – מצביע (בקירוב) לכיוון הקוטב הצפוני של כדור-הארץ; והקוטב הדרומי שלה – S – מצביע (בקירוב) לכיוון הקוטב הדרומי של כדור-הארץ. בהמשך הפרק נרחיב את הדיון על כך.

אם נקרב שני מגנטים זה לזה, נוכל להיווכח כי שני קטבים מגנטיים מאותו סוג (כלומר, שני קטבים מגנטיים צפוניים, או שני קטבים מגנטיים דרומיים) דוחים זה את זה; ואילו שני קטבים מגנטיים מסוגים שונים (כלומר, קוטב מגנטי צפוני וקוטב מגנטי דרומי) מושכים זה את זה.

קטבים מגנטיים וקטבים גיאוגרפיים

עתה נוכל להבין את פעולת המצפן. כדור-הארץ פועל כמוט מגנטי ענק, שהקטבים שלו הם כמתואר באיור 11-5: הקוטב **המגנטי הדרומי** של כדור-הארץ נמצא בסביבת הקוטב הגיאוגרפי **הצפוני**; והקוטב **המגנטי הצפוני** של כדור-הארץ נמצא בסביבות הקוטב הגיאוגרפי **הדרומי**.

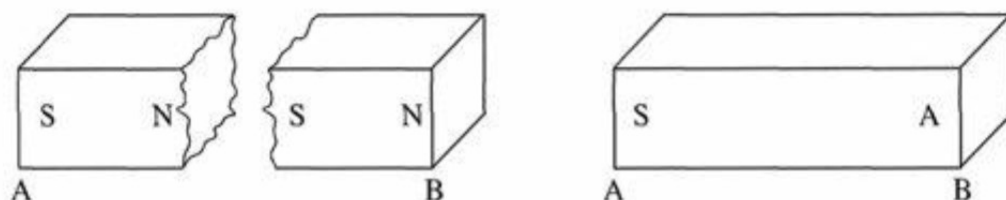


איור 11-5 כדור-הארץ פועל כמוט מגנטי ענק

הקוטב **הצפוני** של המחט המגנטית נמשך אל הקוטב **המגנטי הדרומי** של כדור-הארץ, והקוטב הדרומי של המחט המגנטית נמשך אל הקוטב **המגנטי הצפוני** של כדור-הארץ. לכן במצפן – הקוטב הצפוני של המחט המגנטית פונה (בקירוב) לקוטב הצפוני; והקוטב הדרומי של המחט המגנטית פונה (בקירוב) אל הקוטב הדרומי.

דו-קטבים מגנטיים

אם לוקחים מוט מגנטי וחותכים אותו לשניים, מקבלים שני מגנטים, כמתואר באיור 11-6. קוטביות הקטבים בקצוות A ו-B, נשארת ללא שינוי, ואילו בקצה השני של כל חלק – מופיע קוטב נוסף.



א – הקטבים במגנט שלם ב – הקטבים בשני חלקי המגנט החתוך

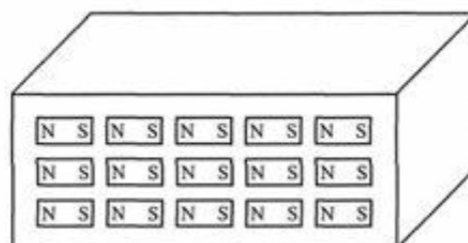
איור 11-6 מגנט שנחתך לשני חלקים

אנו יודעים כי באמצע המגנט השלם לא הייתה מגנטיות חזקה (כפי שראינו בניסוי עם נסורת הברזל). אבל לאחר החיתוך הופיעו קטבים מגנטיים (N ו-S) במשטחי החיתוך, כלומר: באותו אזור עצמו, שקודם לא הייתה בו מגנטיות חזקה. אפשר להמשיך ולחתוך את המגנט, ולקבל קטבים מגנטיים נוספים. באיור 11-7 מופיעים שלושה מגנטים, המתקבלים כשחותכים מגנט לשלושה חלקים.



איור 11-7 שלושה מגנטים שהתקבלו מחיתוך של מוט מגנטי אחד

ככל שנמשיך בתהליך של חיתוך מגנט, נקבל מגנטים רבים יותר וקטנים יותר. עובדה זו מביאה באופן טבעי להשערה, כי המגנט מורכב ממספר רב של מגנטים זעירים, שלכל אחד מהם יש קוטב צפוני וקוטב דרומי. כל מגנט זעיר כזה נקרא **דו-קוטב מגנטי** או **דיפול מגנטי**. באיור 11-8 מופיע תיאור של מוט מגנטי המורכב מדו-קטבים מגנטיים רבים.



איור 11-8 דו-קטבים מגנטיים

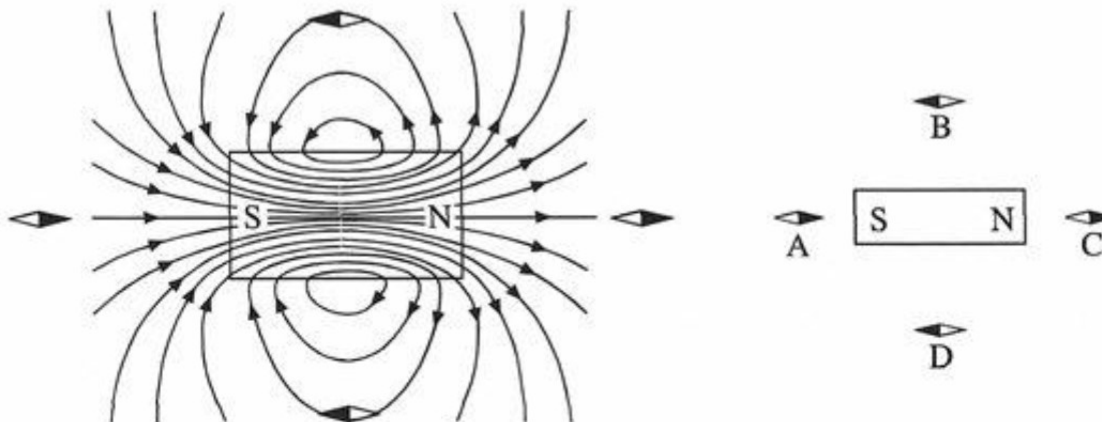
שדה מגנטי של מגנט

ראינו כי מגנטים מושכים או דוחים זה את זה, כלומר, מפעילים כוח זה על זה. כוח הפועל בין מגנטים – נקרא **כוח מגנטי**. ניסויים פשוטים ביותר מראים כי שני מגנטים מושכים או דוחים זה את זה, גם אם אינם נוגעים זה בזה, וגם כאשר הם רחוקים למדי זה מזה. אנו מסיקים מכך כי המגנט גורם לשינוי בסביבתו, כך שאם מגנט אחר נמצא בסביבה זו, פועל עליו כוח מגנטי. אנו אומרים כי כל מגנט יוצר סביבו **שדה מגנטי**. אם מכניסים מגנט לשדה מגנטי, השדה המגנטי מפעיל כוח על מגנט זה.

קווי שדה מגנטיים

עתה נרצה לדעת מהו כיוון הכוח, הפועל על מגנט, הנמצא בשדה מגנטי. כדי לתאר את הכיוון של כוח זה, נציב מחט מגנטית (כלומר, מצפן) בנקודות שונות בשדה המגנטי. הכיוון, שאליו יפנה הקוטב הצפוני של המצפן, הוא כיוון הכוח הפועל על המחט המגנטית בנקודה, שבה מונח המצפן.

באיור 11-9א אנו רואים מוט מגנטי, שמצפן הונח בנקודות שונות בקרבתו (הנקודות הן A, B, C, D). המוט המגנטי יוצר בסביבתו שדה מגנטי. בנקודות שונות נמצאות מחטים מגנטיות. כל מחט מראה את כיוון הכוח המגנטי, הפועל על מחט זו - בנקודה המתאימה.



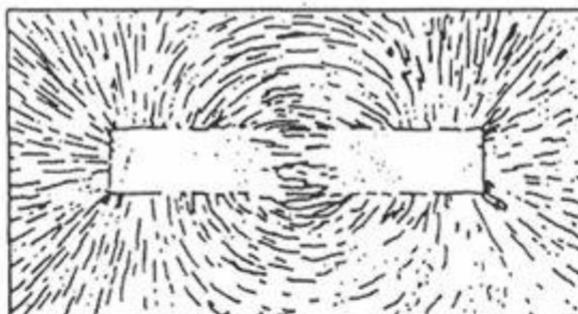
א – כיוון הנטייה של מחט מצפן בנקודות שונות בסביבת מגנט

ב – קווי שדה מגנטי סביב מגנט

איור 11-9 קבלת קווי שדה מגנטי סביב מגנט

עתה נוסיף מחטים מגנטיות, ונסמן בכל נקודה את כיוון המחט המגנטית. לאחר מכן נעביר קו בין הנקודות, כך שבכל נקודה לאורך הקו, המשיק לקו בנקודה זו, הוא הכיוון שאליו תצביע המחט המגנטית, אם ישימו אותה בנקודה זו. קווים אלה נקראים **קווי שדה מגנטי**. באיור 9-11ב מתוארים קווי שדה מגנטי.

באיור 11-10 מופיע תיאור מוחשי של קווי שדה מגנטי סביב מוט מגנטי. תיאור זה מתקבל באמצעות מוט מגנטי, המושך נסורת ברזל. סיבי הנסורת הופכים - בגלל המגנט - למחטים מגנטיות קטנות, המסתדרות בהתאם לכיוון השדה המגנטי בנקודות השונות.



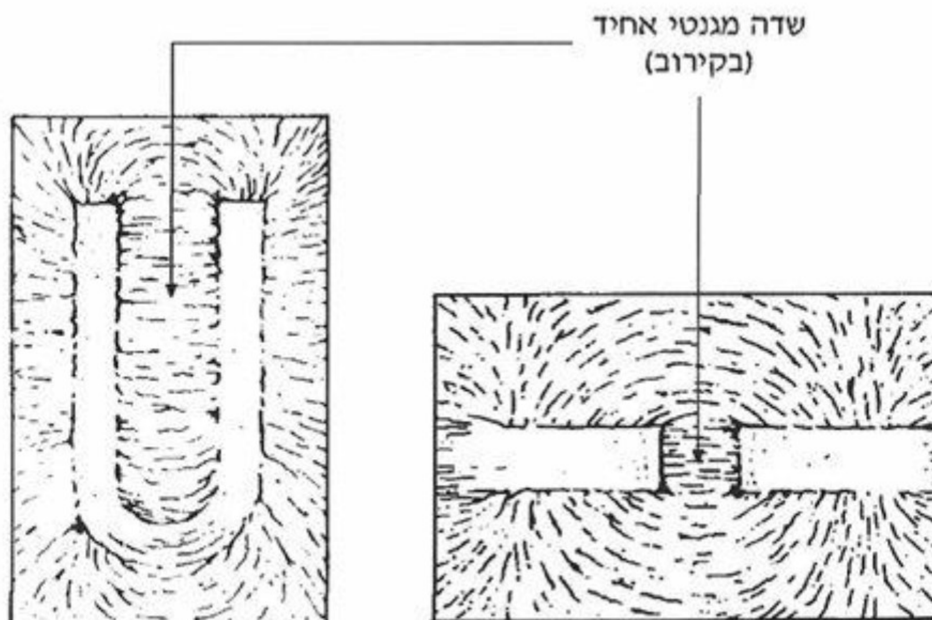
איור 11-10 נסורת ברזל, הנמצאת סביב מגנט, משמשת לתיאור קווי שדה מגנטי סביב המגנט

קווי השדה המגנטי אינם קווים ממשיים. אפשר לראות אותם רק בסרטוטים. אנו משתמשים בקווי השדה המגנטי, כדי להמחיש באמצעותם את השדה המגנטי. הסיבים של נסורת הברזל אינם קווי שדה מגנטי, אך כשהם נמצאים בשדה מגנטי, הם מסתדרים בצורת קווי השדה המגנטי.

שדה מגנטי אחיד

על-פי איור 9-11ב ואיור 11-10, נוכל להסיק כי קווי השדה סביב מגנט הם קווים עקומים, וצפיפותם שונה במרחקים שונים מהמגנט. נשאלת השאלה אם ניתן לקבל שדה מגנטי **אחיד**, שקווי השדה שלו ישרים ומקבילים, והמרחקים ביניהם שווים.

באיור 11-11א מתוארים קווי השדה סביב שני מגנטים, שהקוטב הצפוני של אחד מהם קרוב לקוטב הדרומי של המגנט האחר. כלומר, לפנינו שני מגנטים, שבהם הקטבים שוֹנֵי-השם סמוכים זה לזה.

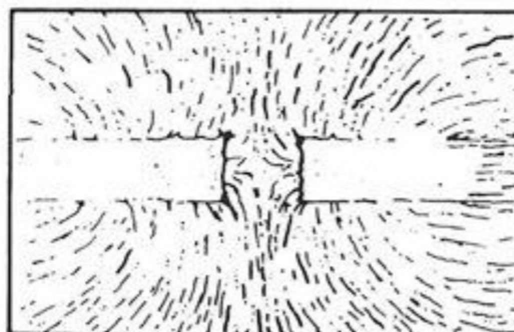


א – קווי השדה המגנטי סביב שני קטבים שוֹנֵי-שם של שני מוטות מגנטיים

ב – קווי השדה של מגנט פרסה

איור 11-11 קווי שדה מגנטי סביב מגנטים שונים

קווי השדה בין הקטבים שוֹנֵי-השם של שני מגנטים, הם – בקירוב טוב – קווים ישרים ומקבילים, שהמרחקים ביניהם שווים. כלומר, בין הקטבים שורר שדה מגנטי אחיד. שדה אחיד מתקבל גם בין הקטבים של מגנט פרסה (איור 11-11ב). השדה המגנטי בין שני קטבים שָׁוֵוי-שם (שני קטבים צפוניים או שני קטבים דרומיים) מתואר באיור 11-12. כאן מתקבל הרושם כאילו קווי השדה בין הקטבים "דוחים" זה את זה.

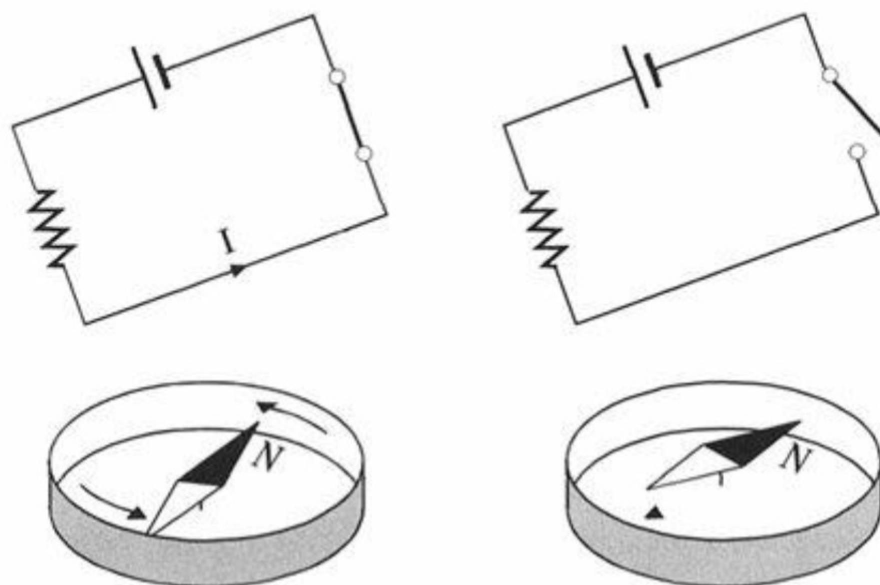


איור 11-12 קווי השדה בין שני קטבים שָׁוֵוי-שם של שני מגנטים

שדה מגנטי הנוצר על-ידי זרם חשמלי

עד כה עסקנו בתופעות מגנטיות, המתרחשות בגלל מגנטים טבעיים (הנקראים לפעמים גם **מגנטים קבועים**). אבל עדיין לא למדנו מדוע נוצרות תופעות מגנטיות, כלומר: מדוע נוצרים שדות מגנטיים.

ציון דרך חשוב בהבנת התופעה המגנטית היה הניסוי, שערך הפיזיקאי הדֶני ארסטד. הניסוי מתואר באיור 11-13. ארסטד לקח מצפן, ובמקביל למחט המגנטית שלו (כלומר: בכיוון צפון-דרום) הניח תיל, שחובר למקור מתח. כאשר סגר את המתג במעגל (כלומר, כאשר בתיל זָרַם זֶרֶם) סטתה מחט המצפן ממקומה, כמתואר באיור 11-13. המסקנה מניסוי זה הייתה, שזרם חשמלי יוצר בסביבתו שדה מגנטי.



ב – בתיל זורם זרם

א – אין זרם בתיל

איור 11-13 הניסוי של ארסטד

הנס כריסטיאן ארסטד

(1851-1777)



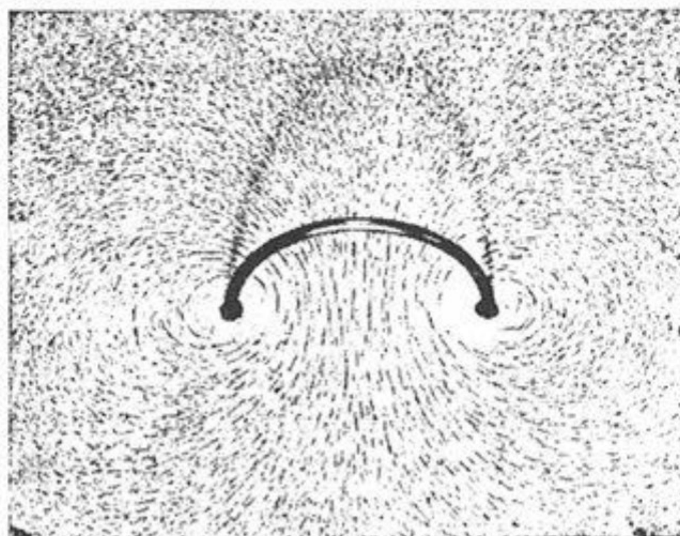
ארסטד היה פיזיקאי וכימאי דני. תרומתו החשובה למדע הייתה גילוי הקשר שבין חשמל למגנטיות, וזאת במהלך שיעור ערב בכיתה ב-1820. על-סמך תגלית זו של ארסטד, ניסח אמפר כמה מחוקי היסוד של תורת החשמל והמגנטיות.

תגלית בכיתה

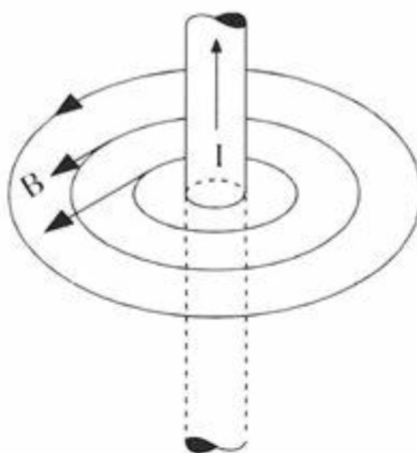
התגלית שהתגלתה בעת הניסוי של ארסטד - בדבר הקשר שבין חשמל למגנטיות - היא, ככל הידוע, התגלית המדעית החשובה היחידה, שהתגלתה בכיתה - במהלך שיעור. לזכר תגלית זו בכיתה, הוציאה אגודת המורים בארצות-הברית מדליה, המוענקת למורים מצטיינים בפיזיקה. המדליה מתארת את הניסוי של ארסטד, ורשום עליה: **הנס כריסטיאן ארסטד, 1820, מדען ומורה.**



כדי להמחיש את קווי השדה המגנטי, הנוצר על-ידי זרם חשמלי, אפשר להשתמש בנסורת ברזל, כפי שעושים לגבי מגנטים קבועים. באיור 11-14א רואים את קווי השדה המגנטי ליד תיל עגול, שזורם בו זרם, ובאיור 11-14ב רואים את קווי השדה ליד תיל ארוך נושא זרם.



א – קווי השדה המגנטי הנוצר על-ידי תיל עגול נושא זרם

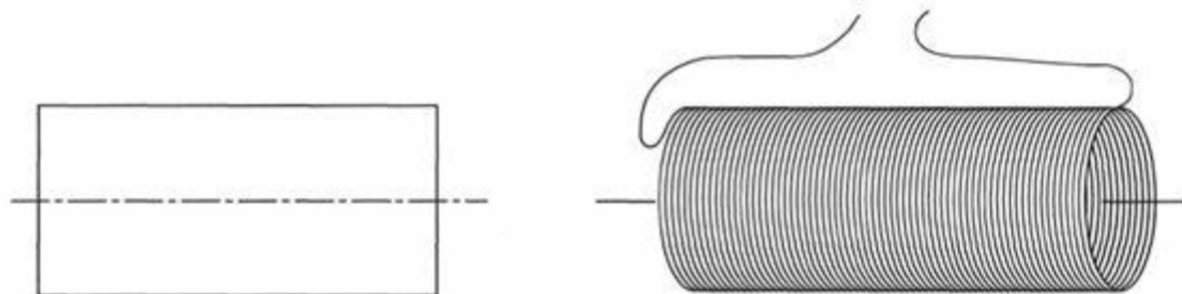


ב – קווי השדה המגנטי הנוצר על-ידי תיל ארוך נושא זרם

איור 11-14 קווי השדה המגנטי של תֵילִים נושאי זרם

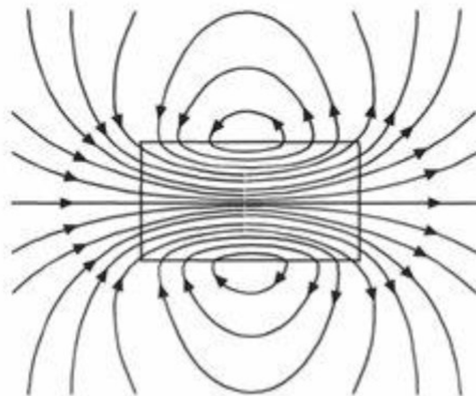
המודל של אמפר

דוגמה נוספת של קווי שדה מגנטי, הנוצר על-ידי זרם חשמלי, מופיעה באיור 11-15. באיור 11-15א מתואר סליל, המורכב מכריכות רבות. סליל כזה נקרא **סולנואיד** (וכן סילונית או סלילונית). באיור 11-15ב מתואר חתך, שנעשה בסולנואיד, ובאיור 11-15ג מתוארים קווי השדה המגנטי בחתך זה. השדה המגנטי נוצר על-ידי הזרם בסולנואיד.



א. סולנואיד

ב. חתך הסולנואיד



ג. קווי השדה המגנטי בחתך הסולנואיד

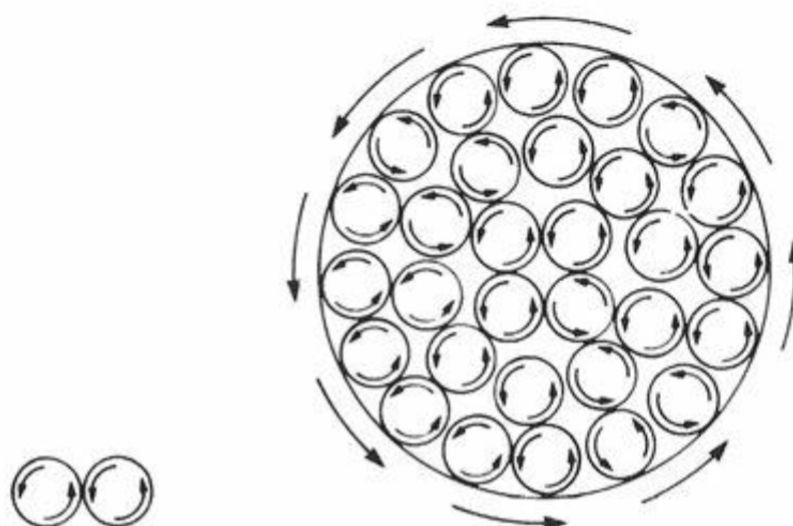
איור 11-15 קווי השדה המגנטי בחתך סולנואיד נושא זרם

נחזור ונסתכל באיור 11-9ב (קווי שדה מגנטי של מוט מגנטי בעל שני קטבים), ונשווה אותו לאיור 11-15ג. נוכל להיווכח בדמיון הרב שבין שני איורים אלה. על-פי דמיון זה, נוכל לשער כי מגנט בעל קטבים מגנטיים (כלומר, מגנט קבוע) מתנהג – למעשה – כאילו הוא מורכב מכריכות רבות, שזורם בהן זרם חשמלי.

הסבר כזה על טבעם של המגנטים הקבועים, הוצע על-ידי אמפר - זמן קצר לאחר פרסום הניסוי של ארסטד. לפי הסבר זה, יש בחומר זרמים מעגליים קטנים מאוד. נקרא לזרמים אלה בשם **עניבות זרם**.

לצורך דיוננו, נוכל לחלק את החומרים לשני סוגים: חומרים מגנטיים וחומרים לא-מגנטיים. בחומרים לא-מגנטיים – עניבות הזרם מפוזרות ללא סדר; ואילו בחומרים מגנטיים – יש הרבה עניבות זרם מסודרות, ובכל אחת מהן זורם זרם שווה באותו כיוון.

באיור 11-16א מתוארות בצורה פשוטה עניבות הזרם בחתך של גליל, העשוי מחומר מגנטי (התיאור המלא מסובך הרבה יותר). כל מעגל קטן באיור זה – מתאר עניבת זרם; והחִצים בכל מעגל כזה – מראים את כיוון הזרם בכל עניבה.



א – עניבות זרם בחתך של גליל מחומר מגנטי ב – שתי עניבות זרם סמוכות

איור 11-16 עניבות זרם בחומר מגנטי

באיור 11-16ב מתוארות שתי עניבות זרם סמוכות. אנו רואים שעניבות אלה נוגעות זו בזו; וכיוון הזרם בעניבה אחת – מנוגד לכיוון הזרם בעניבה הסמוכה. מאחר ששני הזרמים שווים בגודלם והפוכים בכיוונם – הם מבטלים זה את זה.

אם נמשיך ונתבונן בעניבות נוספות, נראה שכל הזרמים בעניבות הפנימיות מבטלים זה את זה, ונשארים רק הזרמים בהיקף החתך. זרמים אלה אינם מתבטלים על-ידי זרמים סמוכים. זרמים אלה זורמים באותו כיוון, ולכן הסכום שלהם הוא זרם, הזורם לאורך היקף החתך, כמסומן באיור 11-16א.

תיארנו את הזרם בחתך אחד בלבד של גליל החומר המגנטי. אם נבדוק את הזרמים הנוצרים בגליל כולו, נקבל זרמים הדומים לזרמים בכריכות של סולנואיד. לכן השדה המגנטי, הנוצר על-ידי מוט של חומר מגנטי, דומה לשדה המגנטי, הנוצר על-ידי סולנואיד נושא זרם.

באמצעות מודל זה, הצליח אמפר להסביר כי במגנט - בדומה לסולנואיד - השדה המגנטי נוצר על-ידי זרם חשמלי. מן הראוי לציין כי מודל זה תואם לתיאור, המקובל כיום והמבוסס על מבנה החומר.

כאמור, החומר מורכב מאטומים, וכל אטום מורכב מגרעין ומאלקטרונים, המסתובבים סביב הגרעין במסלולים סגורים. ניתן לראות כל מסלול כזה ככריכה קטנה, שזורם בה זרם, כלומר: עניבת זרם.

הכוח המגנטי הפועל על מטען, הנע בשדה מגנטי

ראינו כי על מגנט, הנמצא בשדה מגנטי, פועל כוח מגנטי. כאמור, המגנט מכיל עניבות זרם. נסיק מכך כי כוח מגנטי פועל על זרם חשמלי, הנמצא בשדה מגנטי.

מאחר שזרם חשמלי הוא תנועה מכוּוֶנת של מטענים, נסיק כי

כוח מגנטי פועל על מטען, הנע בשדה מגנטי.

נוכל להיווכח בעובדה זו, באמצעות שפופרת קרן קתודית (שק"ק) ומגנט. כאמור, שפופרת כזאת נמצאת במקלט טלוויזיה. כשהשפופרת פועלת, אלקטרונים נעים לעבר המרקע. כשקרן האלקטרונים פוגעת במרקע, נוצר הֶבְזֵק אור מתאים.

אם נניע מגנט ליד המרקע, ניווכח כי קרן האלקטרונים מוזזת ממקומה, והתמונה על המרקע - מתעוותת בהתאם. באיור 17-11 מופיעה תמונה מעוּוֶתֶת של אדם, לאחר שקירבו מגנט למרקע.



איור 17-11 מגנט ליד מרקע טלוויזיה מעוות את התמונה על המרקע

אזהרה: אין לעשות ניסוי זה במקלט הביתי!

הגורמים הקובעים את גודל הכוח המגנטי

כאמור, כוח מגנטי פועל על מטען, הנע בשדה מגנטי. הכוח מסומן על-ידי F, והשדה המגנטי על-ידי B. גודל הכוח תלוי בארבעה גורמים:

א. הגודל של המטען הנע; נסמן את המטען על-ידי q.

ב. גודל השדה המגנטי B.

ג. המהירות v של המטען.

ד. הזווית שבין כיוון התנועה של המטען, לבין כיוון השדה המגנטי.

אם כיוון התנועה של המטען ניצב לכיוון השדה המגנטי (איור 11-18) הכוח המגנטי שווה למכפלה של שלושת הגדלים הבאים: גודל השדה המגנטי, גודל המטען וגודל המהירות של המטען. כלומר:

$$F = qvB \qquad (11\text{-}1)$$

F – כוח

q – מטען

v – מהירות

B – שדה מגנטי

אם כיוון התנועה של המטען אינו ניצב לכיוון השדה המגנטי, גודל הכוח המגנטי F קטן יותר מאשר qvB.



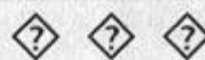
איור 11-18 מטען נע בניצב לכיוון השדה המגנטי

גודל השדה המגנטי

ראינו כי כאשר מטען נע בניצב לכיוון השדה המגנטי, הכוח המגנטי הפועל עליו הוא $F = qvB$. מכאן נקבל כי

$$B = \frac{F}{qv} \qquad (11\text{-}2)$$

כלומר, גודל השדה המגנטי נתון על-ידי הכוח, הפועל על יחידת מטען, הנעה במהירות שגודלה יחידה, בכיוון ניצב לשדה המגנטי.



שאלות חזרה



שאלה 11-1

סמן את המילה הנכונה בכל זוג מילים מודגשות.

א. הקוטב הצפוני של מחט מגנטית (מחט מצפן), נמשך לקוטב הגיאוגרפי **<u>הצפוני / הדרומי</u>** של כדור-הארץ.

ב. הקוטב הדרומי של מחט מגנטית, נמשך אל הקוטב המגנטי **<u>הצפוני / הדרומי</u>**.

ג. הקוטב המגנטי הדרומי נמצא בסביבת הקוטב הגיאוגרפי **הצפוני/הדרומי**.

שאלה 11-2

חותכים מגנט לשני חלקים. כמה קטבים יהיו, בסך-הכל, לשני החלקים?

שאלה 11-3

דו-קוטב (דיפול) מגנטי הוא ...

א. מגנט, שבכל קצה שלו יש שני קטבים.

ב. אחד מהמגנטים הזעירים הרבים, שמהם מורכב מגנט.

ג. שני מגנטים, שלכל אחד מהם קוטב אחד.

ד. קוטב מגנטי שהפך לקוטב גיאוגרפי.

שאלה 11-4

באזור מסוים יש קווי שדה מגנטי ישרים ומקבילים, והמרחקים שווים בין קווים אלה.
באזור זה קיים שדה מגנטי ________ .

שאלה 11-5

"זרם חשמלי גורם לשדה מגנטי." נכון או לא?

שאלה 11-6

לפי מודל אמפר ...

א. אין עניבות זרם בחומרים מגנטיים.

ב. בחומר מגנטי יש עניבות זרם מסודרות.

ג. השדה המגנטי של כל מגנט הוא אחיד.

ד. אם חותכים מגנט לשניים, מתקבלים ארבעה מגנטים.

שאלה 11-7

אחת מהטענות הבאות אינה נכונה. סמן טענה זו.

א. כוח חשמלי פועל על מטען נח.

ב. כוח מגנטי פועל רק על מטען נח, שאינו נמצא בשדה מגנטי.

ג. כוח מגנטי פועל על מטען, הנע בשדה מגנטי.

ד. כוח מגנטי פועל על מגנט, הנמצא בשדה מגנטי.

ה. כוח מגנטי פועל על זרם חשמלי, שהוא תנועה מכוּוֶנֶת של מטענים.

שאלה 11-8

מטען q נע במהירות v בשדה מגנטי B. כיוון התנועה של המטען – ניצב לכיוון השדה המגנטי. הכוח המגנטי F הפועל על המטען, נתון על-ידי

א. $F = qvB$

ב. $F = \frac{qv}{B}$

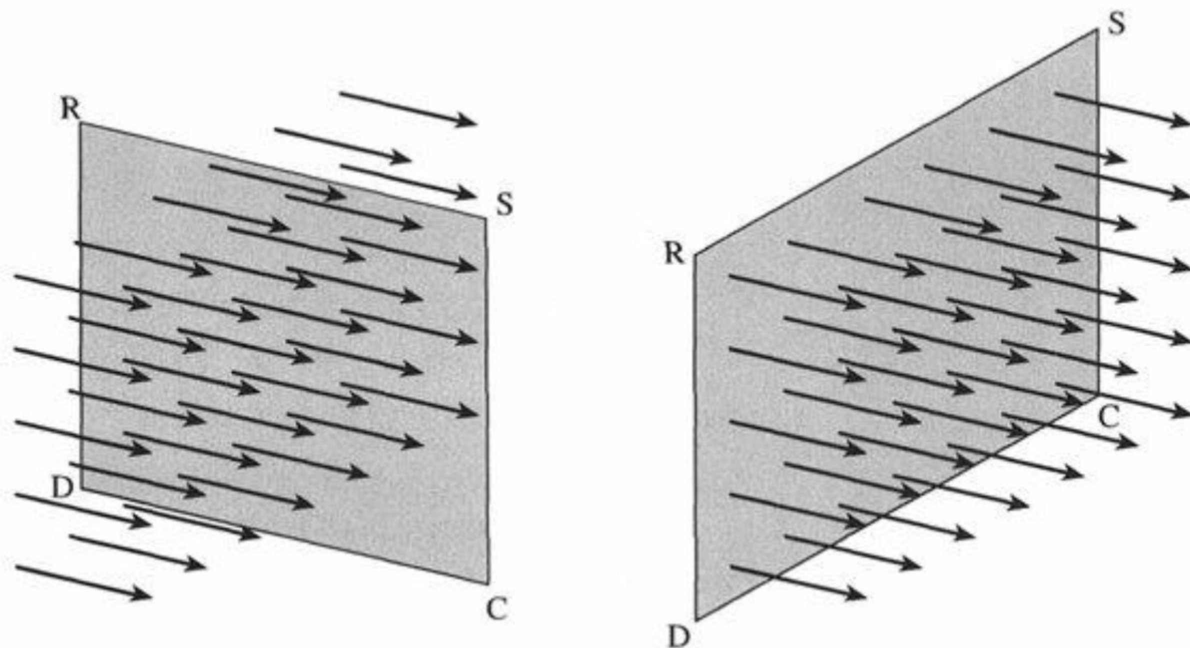
ג. $F = \frac{qB}{v}$

ד. $F = \frac{vB}{q}$

11.2 שטף מגנטי

כאמור, קווי השדה המגנטי מצביעים על כיוון השדה המגנטי בכל נקודה לאורך קווים אלה. את גודל השדה המגנטי באזור מסוים – מציינים באמצעות צפיפות קווי השדה המגנטי באזור זה.

צפיפות קווי השדה המגנטי נתונה על-ידי מספר קווי השדה המגנטי, החודרים דרך יחידת שטח, הניצבת לכיוון קווי השדה המגנטי. באיור 11-19א נתונים N קווי שדה מגנטי, החודרים דרך המשטח CDRS ששטחו A. השדה המגנטי במשטח זה הוא B.



ב – קווי שדה מגנטי מקבילים לשטח נתון

א – קווי שדה מגנטי ניצבים לשטח נתון

איור 11-19 קווי שדה מגנטי ניצבים לשטח נתון, וקווי שדה מגנטי מקבילים לשטח נתון

את קווי השדה, החודרים דרך המשטח, ששטחו A – בניצב לקווי השדה המגנטי – מסרטטים כך, שהמספר N של קווי השדה המגנטי, נמצא ביחס ישר לגודל השדה המגנטי B במשטח זה. נגדיר עכשיו מושג חדש: **שטף מגנטי**. זהו מספר קווי השדה המגנטי, החודרים דרך שטח נתון A, בניצב לשטח הזה. לפי הגדרתנו, השטף דרך המשטח המתואר באיור 11-19א, הוא N.

את השטף המגנטי מסמנים על-ידי Φ. יחידת השטף המגנטי היא ובר (Weber), ומסמנים אותה על-ידי Wb. אם-כן, נקבל כי השטף המגנטי דרך השטח A הוא $\Phi = N$.

באיור **11-19**ב רואים קווי שדה מגנטי, המקבילים למשטח. קווי שדה אלה אינם חודרים דרך המשטח, ולכן השטף Φ דרך משטח זה – הוא אפס. בכל מקרה אחר, כלומר: כאשר קווי השדה המגנטי אינם ניצבים למשטח, ואינם מקבילים למשטח, ערך השטף הוא בין 0 לבין N. דיון נוסף בערכים אלה חורג ממסגרת לימודינו.

וילהלם אדוארד ובר

(1891-1804)



ובר היה פיזיקאי גרמני, בן למשפחה שרבים מבניה היו אנשי מדע. ובר ושני אחיו היו אנשי מדע, ואף שיתפו פעולה במחקרים שונים. וילהלם אדוארד ובר היה האח האמצעי במשפחה זו. הוא היה שותף לאחיו הבכור (שהיה חוקר גדול בתחומים מדעיים שונים) בפיתוח תורת הגלים, ועזר לאחיו הצעיר במחקר על מכניקת שרירי ההליכה של האדם.

במשך שנים עבד ובר במחיצתו של גאוס, ושניהם עסקו במחקרים בחשמל ובמגנטיות. הם ערכו, בין השאר, מדידות במגנטיות של כדור-הארץ, והמציאו טלגרף אלקטרו-מגנטי.

ובר מילא תפקיד חשוב בהתפתחות תורת החשמל, בייחוד בקביעת מערכת היחידות. יחידת השטף **ובר** נקראת על שמו.

יחידת השדה המגנטי

כאמור, מציינים את גודל השדה המגנטי – באזור מסוים – באמצעות צפיפות קווי השדה המגנטי באותו אזור. במילים אחרות: צפיפות השטף המגנטי באזור מסוים – מבטאת את גודל השדה המגנטי באזור זה. אם כך, היחידה שבה נמדד גודל השדה המגנטי היא

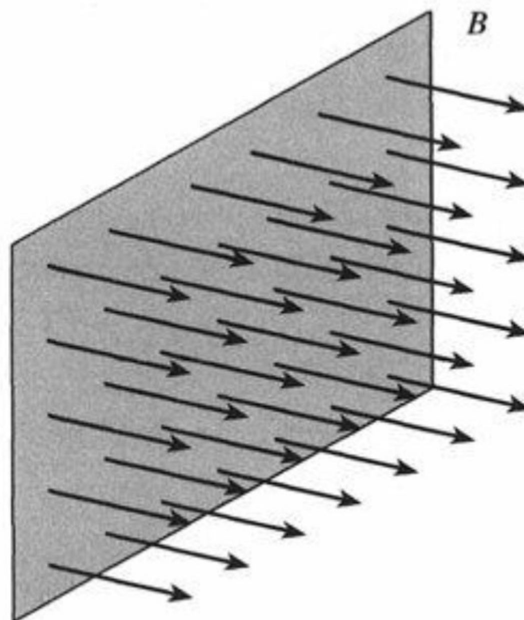
$$\frac{\text{ובר}}{\text{מטר רבוע}} \quad \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$$

יחידת השדה המגנטי (ובר למטר רבוע) נקראת גם טסלה (tesla), ומסומנת גם על-ידי T, כלומר:

$$1\,T = 1\text{ tesla} = 1\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$$

מאחר שהשדה המגנטי מבוטא על-ידי צפיפות השטף המגנטי, קוראים לשדה המגנטי גם בשם צפיפות השטף המגנטי.

נתבונן עתה בתיאור של שדה מגנטי אחיד, שהוא השדה המגנטי הפשוט ביותר. ראינו כבר כי בין הקטבים שוֹנֵי-השם של שני מגנטים שורר שדה מגנטי אחיד, כלומר: שדה מגנטי קבוע בכל הנקודות באזור נתון. גם באיור 11-20 מתואר שדה מגנטי אחיד. כאמור, שדה מגנטי אחיד מתואר באמצעות קווי שדה ישרים ומקבילים, שהמרחקים ביניהם שווים.



איור 11-20 קווי שדה מגנטי בשדה מגנטי אחיד

נניח כי נתון שדה מגנטי אחיד B. עוד נניח שהשדה המגנטי ניצב למשטח, ששטחו A. לפי הסברנו, הגודל של שדה מגנטי זה נתון על-ידי צפיפות השטף המגנטי, כלומר:

$$B = \frac{\Phi}{A} \qquad (11\text{-}3)$$

B – שדה מגנטי

Φ – שטף

A – שטח

ומכאן נקבל כי השטף Φ נתון על-ידי

$$\Phi = BA \qquad (11\text{-}4)$$



דוגמה 11-1

משטח, ששטחו 0.2 מטר רבוע, ניצב לשדה מגנטי אחיד, שגודלו 0.004 טסלה. מהו השטף המגנטי דרך המשטח?

פתרון

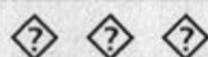
מאחר שהשדה המגנטי אחיד, והוא ניצב למשטח, נוכל להשתמש במשוואה (11-4):

$$\Phi = BA$$

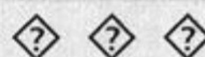
נציב את הנתונים, ונקבל כי

$$\Phi = 0.004 \times 0.2 = 0.0008 \text{ Wb}$$





שאלות חזרה



שאלה 11-9

סמן את הנכון.

צפיפות קווי השדה המגנטי נתונה על-ידי מספר קווי השדה המגנטי, **המקבילים/הניצבים** ליחידת שטח, הנמצאת בשדה המגנטי.

שאלה 11-10

סמן את כל הטענות הנכונות.

א. קווי השדה המגנטי מצביעים על כיוון השדה המגנטי בכל נקודה לאורך קווים אלה.

ב. את גודל השדה המגנטי באזור מסוים – מציינים באמצעות צפיפות קווי השדה המגנטי באותו אזור.

ג. מספר קווי השדה המגנטי, החודרים דרך משטח - בניצב לקווי השדה המגנטי - נמצא ביחס ישר לגודל השדה המגנטי במשטח זה.

שאלה 11-11

השדה המגנטי נתון על-ידי

א. $\frac{\text{שטח}}{\text{שטף}}$

ב. $\frac{\text{שטף}}{\text{שטח}}$

ג. $\text{שטף} \times \text{שטח}$

ד. $\frac{1}{\text{שטף} \times \text{שטח}}$

שאלה 11-12

סמן את המשוואה הנכונה.

א. $\Phi = \frac{B}{A}$

ב. $\Phi = BA$

ג. $\Phi = \frac{A}{B}$

ד. $\Phi = \frac{1}{BA}$

שאלה 11-13

משטח, ששטחו 0.4 מטר רבוע, ניצב לשדה מגנטי אחיד, שגודלו 0.008 טסלה. מהו השטף המגנטי דרך המשטח?

שאלה 11-14

משטח, ששטחו 0.8 מטר רבוע, ניצב לשדה מגנטי אחיד. השטף המגנטי דרך המשטח הוא 0.004 ובר. מהו גודל השדה המגנטי?

סיכום פרק 11

- כדור-הארץ פועל כמוט מגנטי ענק. הקוטב המגנטי הדרומי של כדור-הארץ – נמצא בסביבת הקוטב הגיאוגרפי הצפוני, ולהיפך.
- המגנט מורכב ממספר רב של מגנטים זעירים, שלכל אחד מהם יש קוטב צפוני וקוטב דרומי. כל מגנט זעיר כזה נקרא **דו-קוטב מגנטי** או **דיפול מגנטי**.
- כוח הפועל בין מגנטים – נקרא **כוח מגנטי**. כל מגנט יוצר סביבו **שדה מגנטי**. אם מכניסים מגנט לשדה מגנטי, השדה המגנטי מפעיל כוח על מגנט זה. לשדה מגנטי יש **קווי שדה מגנטי**. לשדה מגנטי **אחיד יש** קווי שדה מגנטי ישרים ומקבילים, והמרחקים ביניהם שווים.
- מגנט בעל קטבים מגנטיים (כלומר, מגנט קבוע) מתנהג – למעשה – כאילו הוא מורכב מכריכות רבות, שזורם בהן זרם חשמלי.
- זרם חשמלי יוצר בסביבתו שדה מגנטי. שדה מגנטי נוצר, למשל, על-ידי הזרם בסולנואיד.
- יש בחומר זרמים מעגליים קטנים מאוד, הנקראים **עניבות זרם**. בחומרים לא-מגנטיים – עניבות הזרם מפוזרות ללא סדר; ואילו בחומרים מגנטיים – יש הרבה עניבות זרם מסודרות, ובכל אחת מהן זורם זרם שווה באותו כיוון.
- כוח מגנטי F פועל על מטען, הנע בשדה מגנטי. גודל הכוח תלוי בגורמים שלהלן:

א. הגודל של המטען הנע q.

ב. גודל השדה המגנטי B.

ג. המהירות v של המטען.

ד. הזווית שבין כיוון התנועה של המטען, לבין כיוון השדה המגנטי.

- אם כיוון התנועה של המטען ניצב לכיוון השדה המגנטי, הכוח המגנטי שווה למכפלה של שלושת הגדלים הבאים: גודל השדה המגנטי, גודל המטען וגודל המהירות של המטען. כלומר: $F = qvB$. אם כיוון התנועה של המטען אינו ניצב לכיוון השדה המגנטי, גודל הכוח המגנטי F קטן יותר מאשר qvB.

- קווי השדה המגנטי מצביעים על כיוון השדה המגנטי בכל נקודה לאורך קווים אלה. את גודל השדה המגנטי באזור מסוים – מציינים באמצעות צפיפות קווי השדה המגנטי באזור זה. צפיפות קווי השדה המגנטי נתונה על-ידי מספר קווי השדה המגנטי, החודרים דרך יחידת שטח, הניצבת לכיוון קווי השדה המגנטי.

- את קווי השדה, החודרים דרך המשטח, ששטחו A – בניצב לקווי השדה המגנטי – מסרטטים כך, שהמספר N של קווי השדה המגנטי, נמצא ביחס ישר לגודל השדה המגנטי B במשטח זה. נגדיר עכשיו מושג חדש: **שטף מגנטי**. זהו מספר קווי השדה המגנטי, החודרים דרך שטח נתון A, בניצב לשטח הזה.

- את השטף המגנטי מסמנים על-ידי Φ. יחידת השטף המגנטי היא ובר (Weber), ומסמנים אותה על-ידי Wb. אם-כן, נקבל כי השטף המגנטי דרך השטח A הוא $\Phi = N$. כאשר קווי השדה המגנטי אינם ניצבים למשטח, ואינם מקבילים למשטח, ערך השטף הוא בין 0 לבין N.

- היחידה שבה נמדד גודל השדה המגנטי היא $\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$. יחידת השדה המגנטי (ובר למטר רבוע) נקראת גם טסלה (tesla), ומסומנת גם על-ידי T, כלומר:

$$1\,\text{T} = 1\,\text{tesla} = 1\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$$

- מאחר שהשדה המגנטי מבוטא על-ידי צפיפות השטף המגנטי, קוראים לשדה המגנטי גם בשם **צפיפות השטף המגנטי**. השטף המגנטי מסומן על-ידי Φ. הגודל של השדה המגנטי נתון על-ידי צפיפות השטף המגנטי, כלומר: $B = \frac{\Phi}{A}$.

12

כוחות מגנטיים הפועלים על מטענים הנעים בשדה מגנטי

12.1 גודל הכוח הפועל על תיל נושא זרם, הנמצא בשדה מגנטי

בסעיף 1.11 למדנו לחשב את הכוח המגנטי, הפועל על מטען, הנע בשדה מגנטי. ראינו כי הכוח F, הפועל על מטען, הנע במהירות v בניצב לשדה המגנטי B, נתון על-ידי משוואה (11-1):

$$F = qvB$$

מאחר שהזרם החשמלי הוא תנועה מכוּוֶנֶת של מטענים, הרי שכוח מגנטי יפעל על זרם חשמלי, הנמצא בשדה מגנטי. נניח כי בתיל, שאורכו P, זורם זרם I. אם כיוון הזרם בתיל ניצב לכיוון השדה המגנטי B, נקבל כי הכוח המגנטי נתון על-ידי

$$F = BI\ell \qquad (12\text{-}1)$$

F – כוח

B – שדה מגנטי

I – זרם

ℓ – אורך

אם כיוון הזרם אינו ניצב לכיוון השדה המגנטי B, גודל הכוח המגנטי F קטן יותר מאשר $BI\ell$.

אם השדה המגנטי נתון ביחידות טסלה, האורך נתון במטרים, והזרם נתון באמפרים - אז הכוח נתון ביחידות ניוטון.



דוגמה 12-1

תיל נושא זרם נמצא בשדה מגנטי אחיד, שגודלו 1.5 טסלה. הזרם בתיל הוא 0.02 A, ואורך התיל - 0.4 m. נתון כי כיוון הזרם ניצב לכיוון השדה המגנטי. חשב את הכוח המגנטי, הפועל על התיל.

פתרון

נציב במשוואה (12-1), $F = BI\ell$, את הנתונים, ונקבל כי

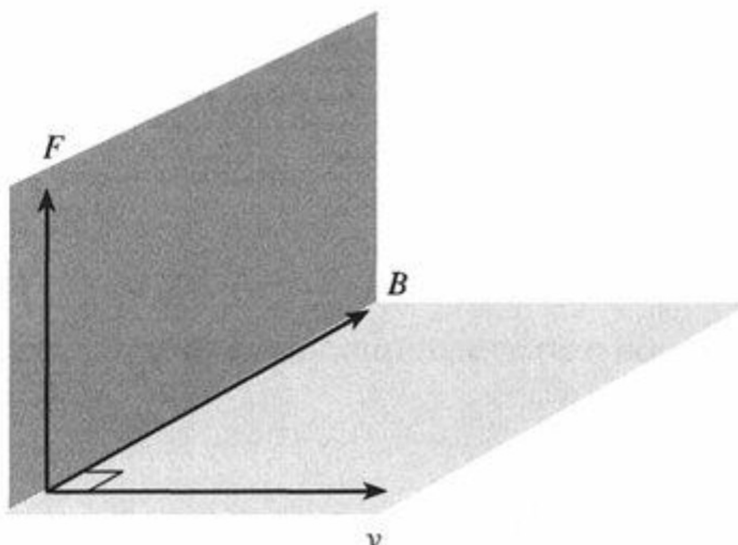
$$F = BI\ell = 1.5 \times 0.02 \times 0.4 = 0.012\ N$$



12.2 מציאת כיוון הכוח הפועל על מטען נע, או על תיל נושא זרם, הנמצאים בשדה מגנטי

עד עכשיו עסקנו בגודל הכוח הפועל על מטען, הנע בשדה מגנטי; וכן בגודל הכוח הפועל על תיל נושא זרם, הנמצא בשדה מגנטי. אך עדיין איננו יודעים את כיוון הכוח הזה.

ניסויים מראים כי כיוון הכוח המגנטי ניצב הן לכיוון השדה המגנטי, והן לכיוון המהירות של המטען הנע. באיור 12-1 מתואר הכיוון של כל אחד משלושת הגדלים: הכוח F, השדה המגנטי B והמהירות v.



איור 12-1 כיוון הכוח המגנטי F, הפועל על מטען, הנע במהירות v בשדה מגנטי B

כדי למצוא את כיוון הכוח המגנטי, הפועל על מטען הנע בשדה מגנטי, ניתן להשתמש **בכלל היד השמאלית** (איור 12-2). אם המטען הנע הוא חיובי, הרי שכלל היד השמאלית קובע:

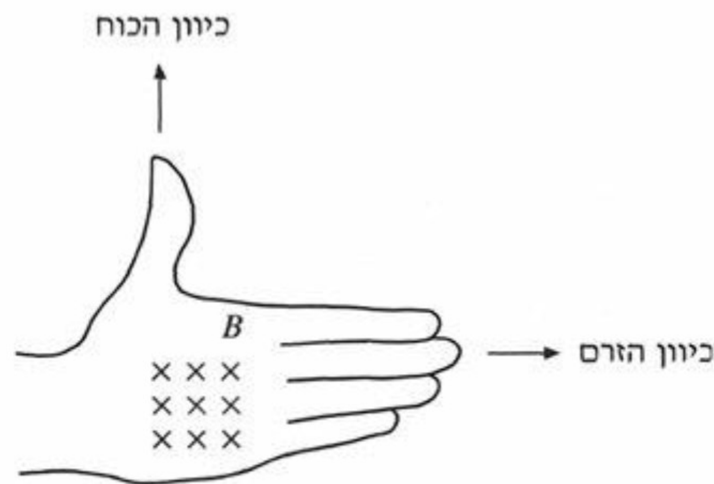
מותחים את אצבעות כף יד שמאל. מעמידים כף יד זו, כך שקווי השדה המגנטי ייכנסו לכף היד, ומכוונים את האצבעות, כך שהכיוון שלהן יהיה בכיוון תנועת המטען החיובי. כיוון הכוח יהיה אז בכיוון האגודל. אם המטען הנע באיור 12-2 הוא שלילי, הרי שכיוון הכוח יהיה הפוך לזה שבאיור 12-2.



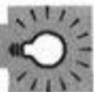
איור 12-2 כלל היד השמאלית לקביעת כיוון הכוח, הפועל על מטען חיובי, הנע בשדה מגנטי

כיוון הכוח המגנטי, הפועל על תיל נושא זרם, נקבע גם הוא לפי כלל היד השמאלית (איור 12-3), אלא שאצבעות יד שמאל מצביעות על כיוון הזרם. הזרם כאן הוא הזרם המוסכם, כלומר: תנועה מכוּוֶנֶת של מטענים חיוביים.

אם אחד הגדלים (השדה המגנטי, הזרם, המהירות או הכוח) מכוון אלינו (כלומר יוצא מן הדף), נהוג לסמנם על-ידי ⊙, ואם כיוונו מאיתנו והלאה (כלומר, נכנס לתוך הדף), נהוג לסמנו על-ידי × (כאילו אנו רואים רק זנב חץ, שכיוונו מאיתנו והלאה). כיוון השדה המגנטי באיור 12-3, הוא מאיתנו והלאה.



איור 12-3 כלל היד השמאלית לקביעת כיוון הכוח, הפועל על תיל נושא זרם, הנמצא בשדה מגנטי



דוגמה 12-2

תיל נושא זרם נמצא בשדה מגנטי.

א. מה כיוון הכוח המגנטי, הפועל על תיל זה, אם כיוון הזרם הפוך לכיוון הזרם שבאיור 12-3?

ב. מה יהיה כיוון הכוח המגנטי, הפועל על תיל זה, אם גם כיוון השדה המגנטי הפוך לכיוון השדה המגנטי שבאיור 12-3?

פתרון

א. לפי כלל היד השמאלית, כיוון הכוח יהיה הפוך לכיוון הכוח שבאיור 12-3.

ב. כיוון הכוח יהיה זהה לכיוון הכוח שבאיור 12-3, כלומר: כלפי מעלה.



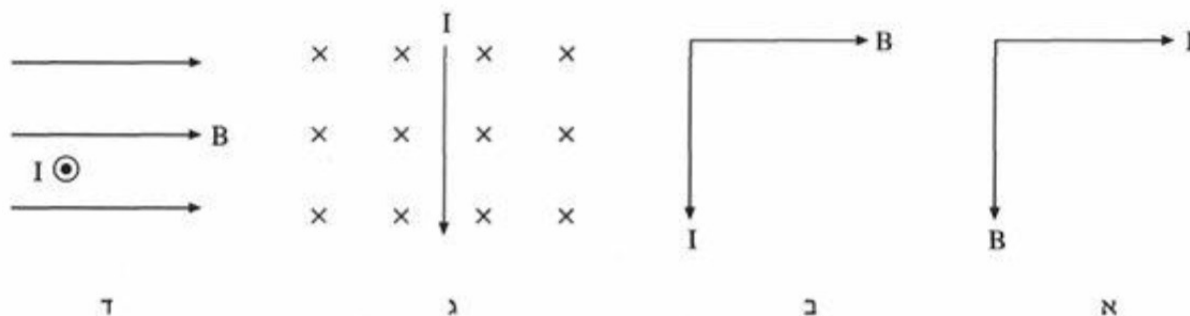
שאלות חזרה

שאלה 12-1

תיל נושא זרם נמצא בשדה מגנטי אחיד, שגודלו 0.5 טסלה. הזרם בתיל הוא 0.02 A, ואורך התיל – 0.8 מטר. נתון כי כיוון הזרם ניצב לכיוון השדה המגנטי. מה גודל הכוח המגנטי, הפועל על התיל?

שאלה 12-2

תיל נושא זרם נמצא בשדה מגנטי. כיוון הזרם וכיוון השדה המגנטי מתוארים בארבעה מצבים שונים (איור 12-4). מהו כיוון הכוח בכל מצב?



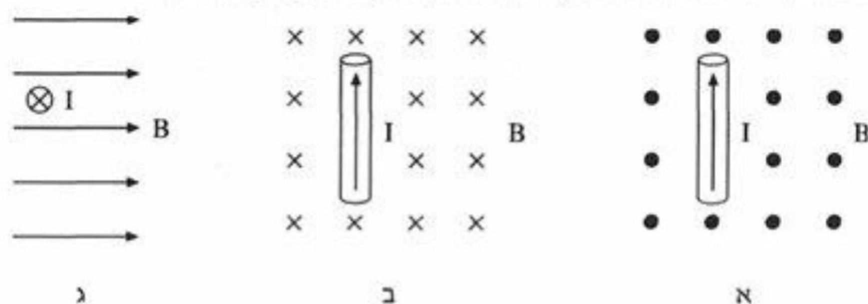
איור 12-4

שאלה 12-3

נסח את כלל היד השמאלית לגבי כיוון תנועת האלקטרונים בתיל נושא זרם, הנמצא בשדה מגנטי.

שאלה 12-4

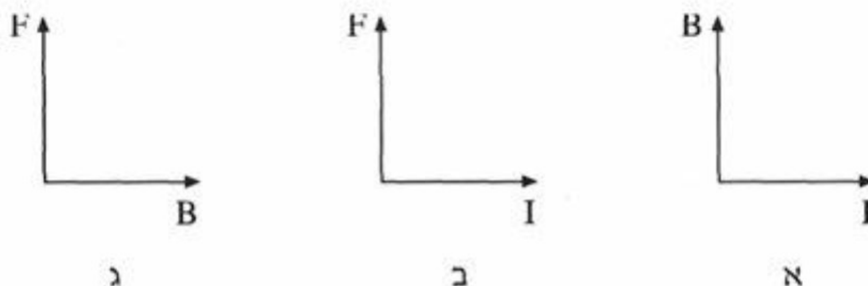
תיל נושא זרם נמצא בשדה מגנטי. כיוון הזרם וכיוון השדה המגנטי מתוארים בשלושה מצבים שונים באיור 12-5. מהו כיוון הכוח המגנטי, הפועל על התיל?



איור 12-5

שאלה 12-5

תיל נושא זרם נמצא בשדה מגנטי. מצא בכל מקרה את כיוון הגודל השלישי (כוח מגנטי, שדה מגנטי או זרם), כשנתונים הכיוונים של שניים מתוך שלושת הגדלים (איור 12-6).



איור 12-6

סיכום פרק 12

- נניח כי בתיל, שאורכו ℓ , זורם זרם I. אם כיוון הזרם בתיל ניצב לכיוון השדה המגנטי B, נקבל כי הכוח המגנטי F נתון על-ידי $F = BI\ell$. אם כיוון הזרם אינו ניצב לכיוון השדה המגנטי B, גודל הכוח המגנטי F קטן יותר מאשר $BI\ell$.
- אם השדה המגנטי נתון ביחידות טסלה, האורך נתון במטרים, והזרם נתון באמפרים - אז הכוח נתון ביחידות ניוטון.
- כיוון הכוח המגנטי, הפועל על מטען חיובי, הנע בשדה מגנטי, ניצב הן לכיוון השדה המגנטי, והן לכיוון המהירות של המטען הנע. כדי למצוא את כיוון הכוח המגנטי, הפועל על מטען הנע בשדה מגנטי, ניתן להשתמש ב**כלל היד השמאלית**.
- אם המטען הנע הוא חיובי, הרי שכלל היד השמאלית קובע: מותחים את אצבעות כף יד שמאל. מעמידים כף יד זו, כך שקווי השדה המגנטי ייכנסו לכף היד, ומכוונים את האצבעות, כך שהכיוון שלהן יהיה בכיוון תנועת המטען החיובי. כיוון הכוח יהיה אז בכיוון האגודל. אם המטען הנע – שלילי, הרי שכיוון הכוח יהיה הפוך.

13

השדות המגנטיים הנוצרים על-ידי מוליכים שונים

13.1 השדות המגנטיים הנוצרים על-ידי מוליכים שונים

בפרקים הקודמים עסקנו בכוחות, ששדות מגנטיים מפעילים על מטענים נעים. עסקנו בעיקר בשדות מגנטיים אחידים, המתוארים על-ידי קווי שדה ישרים ומקבילים. מובן כי לא כל השדות המגנטיים הם אחידים; קווי השדה, המתארים שדות לא אחידים, הם קווים עקומים.

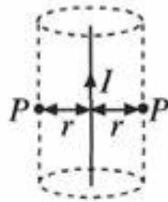
בסעיף זה נדון בשדות מגנטיים, הנוצרים על-ידי תַיִלִים בעלי צורות פשוטות, שזורם בהם זרם. באופן כללי, נרצה לענות על השאלה הבאה:

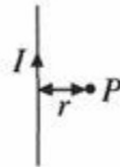
מה גודלו וצורתו של השדה המגנטי, הנוצר על-ידי זרם, שגודלו ומסלולו נתונים?

השדה המגנטי, הנוצר בנקודה מסוימת על-ידי תיל נושא זרם, הוא סכום השדות המגנטיים, הנוצרים בנקודה זו על-ידי כל אחד מהמטענים, המרכיבים את הזרם. חישוב השדה המגנטי הכללי, הנוצר באותה נקודה על-ידי תיל, הוא לפעמים מסובך מאוד.

נדון רק בתַיִלִים נושאי זרם, שמסלול הזרם בהם מאפשר חישוב פשוט למדי של השדות המגנטיים באזורים מסוימים במרחב. נתחיל את דיוננו בתיל ישר, ארוך מאוד, הנושא זרם I (איור 13-1א).

באיור 13-1ב מסומנת הנקודה P, הנמצאת במרחק r מהתיל, ובאיור 13-1ג אנו רואים גליל, שכל נקודות המעטפת שלו נמצאות במרחק r מהתיל.







א – תיל ארוך מאוד הנושא זרם I

ב הנקודה P נמצאת במרחק r מהתיל

ג הנקודות על מעטפת הגליל נמצאות במרחק r מהתיל

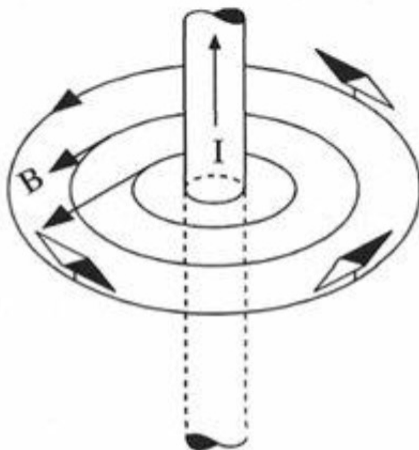
איור 13-1 מציאת השדה המגנטי במרחק r מתיל ארוך מאוד, הנושא זרם I

ניתן להראות כי גודל השדה המגנטי B – במרחק r מהתיל – נתון על-ידי

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \qquad (13\text{-}1)$$

μ_0 הוא קבוע שערכו $4\pi \times 10^{-7}$ $\frac{\text{ובר}}{\text{מטר} \times \text{אמפר}}$. בהמשך נדון בגודל זה. במשוואה זו – הזרם נתון באמפרים, המרחק - במטרים, והשדה המגנטי – ביחידות טסלה.

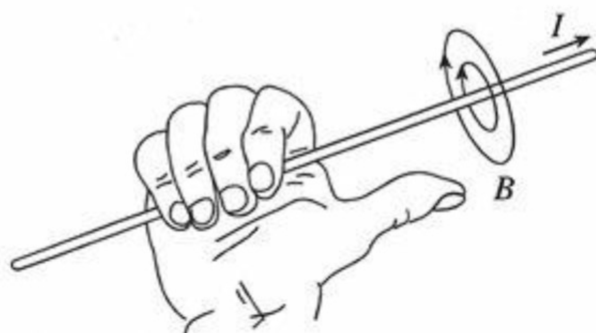
מהמשוואה $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$ ניתן לדעת את גודל השדה המגנטי B, בכל נקודה שמרחקה r מתיל מוליך ישר וארוך מאוד, הנושא זרם I. קווי השדה המגנטי, הנוצרים על-ידי תיל כזה, מתוארים באיור 13-2. קווי השדה הם מעגלים, שהתיל נמצא במרכזם.



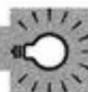
איור 13-2 קווי השדה המגנטי הנוצרים על-ידי תיל מוליך ישר וארוך, הנושא זרם I. מחט המצפן מצביעה על כיוון השדה המגנטי בנקודה, שבה נמצאת המחט.

כיוון השדה המגנטי נקבע לפי **כלל היד הימנית**:

מניחים את יד ימין כך, שהאצבעות סוגרות על התיל נושא הזרם (איור 13-3), והאגודל מופנה בכיוון הזרם. האצבעות מראות את כיוון קווי השדה המגנטי, הנוצר על-ידי הזרם.



איור 13-3 כלל היד הימנית לקביעת כיוון קווי השדה המגנטי



דוגמה 13-1

מהו גודל השדה המגנטי במרחק מטר אחד מתיל ישר ארוך מאוד, הנושא זרם של אמפר אחד?

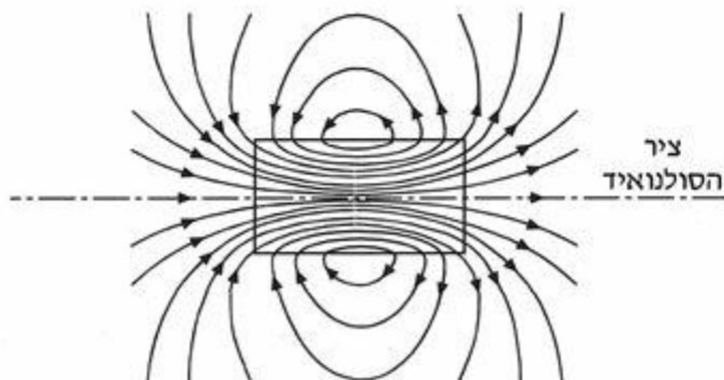
פתרון

נתון כי $I = 1\text{ A}$, $r = 1\text{m}$. נציב נתונים אלה במשוואת השדה המגנטי (13-1), הנוצר על-ידי תיל ישר וארוך הנושא זרם, ונקבל כי

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 1}{2\pi \times 1} = 2 \times 10^{-7} \text{ טסלה} = 0.0000002 \text{ טסלה}$$



בפרק 11 עסקנו כבר בשדה המגנטי, הנוצר על-ידי סולנואיד נושא זרם. באיור 11-15ג מתוארים קווי השדה בחתך הסולנואיד. מטעמי נוחות, חזרנו והבאנו כאן את התיאור של קווי שדה אלה (איור 13-4).



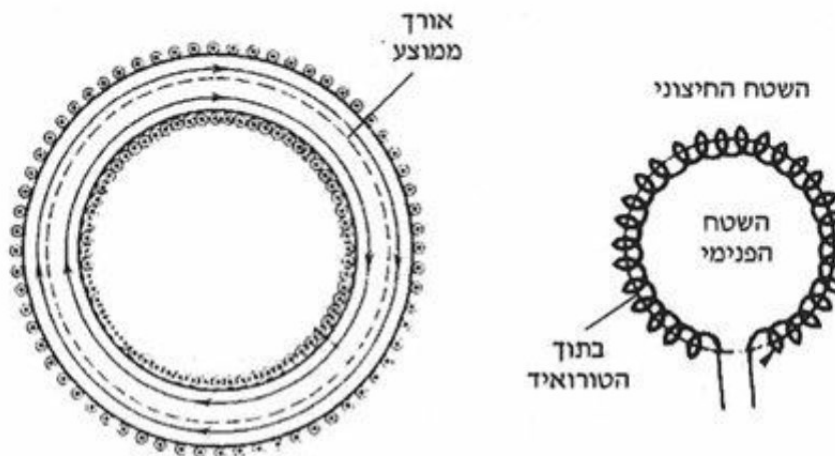
איור 13-4 קווי השדה המגנטי בחתך של סולנואיד

אנו רואים כי קווי השדה מתפזרים ומתרחקים זה מזה, ככל שמתקרבים לקצות הסולנואיד; ואילו קווי השדה במרכז הסולנואיד מקבילים כמעט לציר הסולנואיד. אם-כן, נסיק כי ניתן ליצור שדה מגנטי חזק בתחום שבתוך הסולנואיד, כך שקווי השדה יהיו מקבילים כמעט לציר הסולנואיד.

גודל השדה המגנטי B, הנוצר בתוך הסולנואיד, תלוי בגודל הזרם I הזורם בסולנואיד, במספר הכריכות N של הסולנואיד ובאורך ℓ של הסולנואיד (האורך מסומן באיור 13-4). ניתן להראות כי

$$B = \mu_0 \frac{NI}{\ell} \qquad (13\text{-}2)$$

אם נקפל את הסולנואיד לצורת טבעת (איור 13-5א), נקבל גוף הנקרא **טורואיד**. השדה המגנטי, הנוצר על-ידי טורואיד נושא זרם, כלוא – ברובו הגדול – בתוך הטורואיד (כפי שאפשר לראות באיור 13-5ב). שדה מגנטי זה הוא אחיד, וקווי השדה הם מעגלים, שמרכזם הוא מרכז הטורואיד.



איור 13-5 טורואיד וקווי השדה המגנטי בתוכו

גם שדה מגנטי זה נתון על-ידי

$$B = \mu_0 \frac{NI}{\ell}$$

אך הפעם – ℓ הוא האורך הממוצע של ציר הטורואיד (איור 13-5ב). אורך זה שווה לאורך הסולנואיד, המתקבל לאחר פריסת הטורואיד.



דוגמה 13-2

נתון טורואיד בעל 50 כריכות. האורך הממוצע של הטורואיד הוא 40 ס"מ (כלומר, 0.4 מ'). חשב את השדה המגנטי בתוך הטורואיד, אם הזרם בטורואיד הוא 2 A.

פתרון

נרשום תחילה את הנתונים: $I = 2\ \text{A}$, $N = 50$, $\ell = 0.4\ \text{m}$,

$$\mu_0 = 4\pi\times10^{-7}\ \frac{\text{ובר}}{\text{מטר}\times\text{אמפר}}$$

נציב את הנתונים במשוואה (13-2), ונקבל את השדה המגנטי בתוך הטורואיד:

$$B = \mu_0\frac{NI}{\ell} = 4\pi\times10^{-7}\times\frac{50\times2}{0.4} = 0.0003\ \text{טסלה}$$

השדה המגנטי בתוך הטורואיד הוא 0.0003 טסלה.



שאלות חזרה

שאלה 13-1

רק טענה אחת מהבאות <u>אינה</u> נכונה. סמן אותה.

א. שדה מגנטי מפעיל כוח על מטען נע.

ב. מטען נע יוצר שדה מגנטי.

ג. מטען נח יוצר שדה מגנטי.

ד. זרם חשמלי יוצר שדה מגנטי.

ה. מטען יכול להימצא בשדה מגנטי, הנוצר על-ידי מטען אחר.

שאלה 13-2

נתון תיל ישר וארוך מאוד, הנושא זרם של 4 A. מה גודל השדה המגנטי במרחק שני מטר מתיל זה?

שאלה 13-3

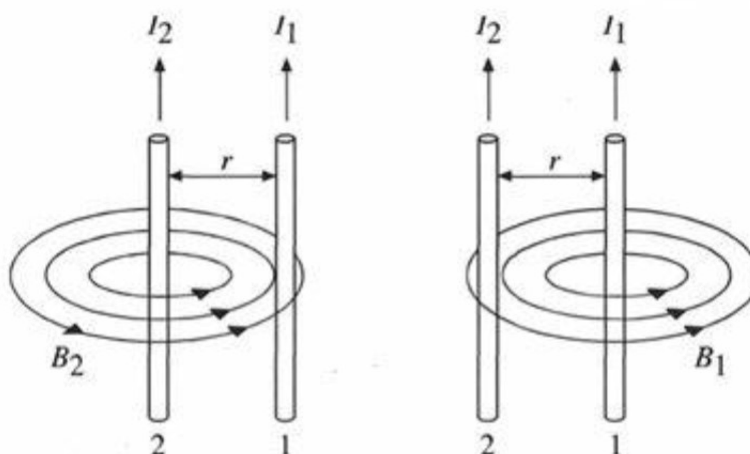
א. נתון טורואיד בעל 50 כריכות. האורך הממוצע של הטורואיד – הוא 20 cm (כלומר 0.2 m). חשב את השדה המגנטי בתוך הטורואיד, אם הזרם בטורואיד הוא 4 A.

ב. חזור על הסעיף הראשון, אלא שהזרם בטורואיד הוא 12 A.

13.2 הכוח הפועל בין שני תֵילִים ארוכים נושאי זרם

עד כה למדנו לחשב את גודל השדה המגנטי, הנוצר על-ידי תיל ישר וארוך, הנושא זרם. נוסף על כך, למדנו למצוא, באמצעות כלל היד הימנית, את הכיוון של שדה מגנטי זה. כן למדנו לחשב את **גודל** הכוח המגנטי, הפועל על תיל נושא זרם, הנמצא בשדה מגנטי ; ולפי כלל היד השמאלית, למדנו למצוא את ה**כיוון** של כוח זה. עכשיו נלמד לחשב את הגודל ואת הכיוון של הכוח המגנטי, הפועל בין שני תֵילִים מקבילים, נושאי זרם.

באיור 13-6א מופיעים שני תֵילִים ארוכים, ישרים ומקבילים. בתיל הימני זורם הזרם I_1, ובתיל השמאלי - הזרם I_2. השדה המגנטי, הנוצר על-ידי תיל 1 הוא B_1, וקווי השדה המגנטי של תיל זה – מתוארים באיור זה.



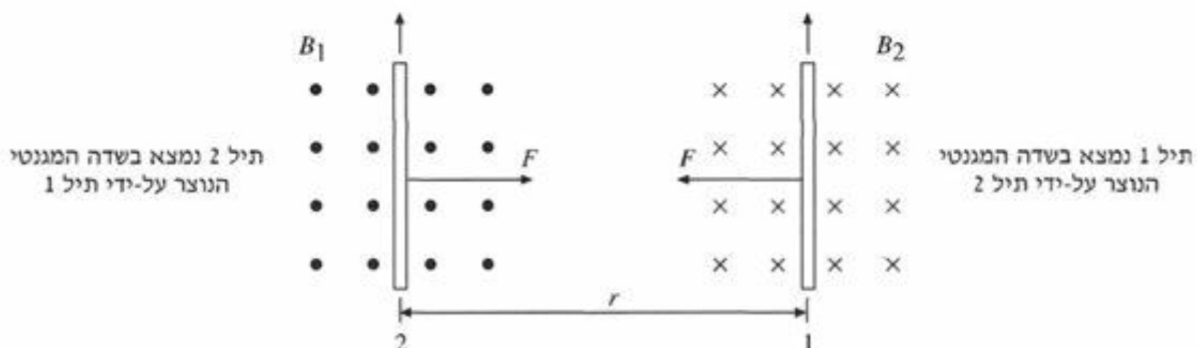
ב – קווי השדה המגנטי של תיל 2   א – קווי השדה המגנטי של תיל 1

איור 13-6 שני תֵילִים ארוכים, ישרים ומקבילים, שבכל אחד מהם זורם זרם באותו כיוון

א. כיוון הכוח בין התֵילִים

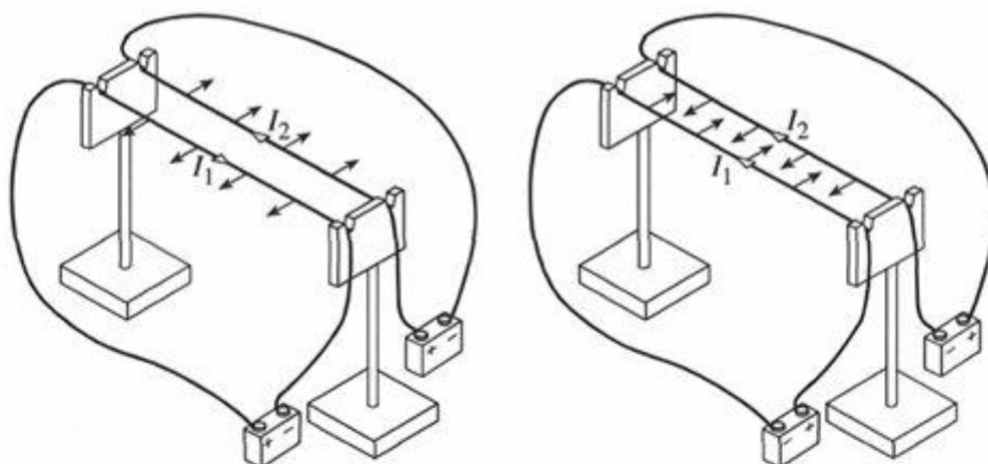
ראינו כי קווי השדה המגנטי, הנוצרים על-ידי תיל ישר וארוך, הם מעגלים. מכאן שקווי השדה המגנטי, הנוצרים על-ידי כל אחד מהתֵילִים שבאיור 13-6, הם מעגלים. לפי כלל היד הימנית, מקבלים את כיוון קווי השדה, הנוצרים על-ידי כל אחד מתֵילִים אלה.

כל אחד משני התֵילִים נמצא בשדה המגנטי, הנוצר על-ידי התיל האחר. נשתמש בכלל היד השמאלית, כדי למצוא את כיוון הכוח, שמפעיל כל תיל על התיל האחר. מקבלים כי שני התֵילִים מושכים זה את זה (איור 13-7). כלומר, שני תֵילִים ישרים ומקבילים, שזורמים בהם זרמים באותו כיוון, מושכים זה את זה (כל אחד מהתֵילִים מושך את התיל האחר בכוח F).



איור 13-7 הכוחות המגנטיים שמפעילים זה על זה שני תֵילִים ישרים ומקבילים, שזורם בהם זרם

באיור 13-8 מתואר ניסוי פשוט, המראה את כוחות המשיכה או הדחייה בין תֵילִים ישרים ומקבילים, שזורם בהם זרם. בניסוי זה מזרימים זרמים, באמצעות מקורות מתח, בשני תֵילִים מקבילים. פעם אחת מזרימים את הזרמים בשני התֵילִים באותו כיוון (איור 13-8א), ובפעם השנייה - בכיוונים מנוגדים (איור 13-8ב).



ב – הזרמים בכיוונים מנוגדים; התֵילִים דוחים זה את זה.

א – הזרמים באותו כיוון; התֵילִים מושכים זה את זה

איור 13-8 ניסוי המראה קיומם של כוחות בין תֵילִים מקבילים, שזורם בהם זרם

ב. גודל הכוח הפועל בין שני תֵילִים

ראינו כי גודל השדה המגנטי B_1, במרחק r מתיל ישר ארוך, הנושא זרם I_1, נתון על-ידי משוואה (13-1):

$$B_1 = \mu_0 \frac{I_1}{2\pi r}$$

נתון כי תיל שני נמצא בשדה המגנטי B_1, הנוצר על-ידי התיל הראשון, כך ששני התֵּילִים מקבילים זה לזה. בתיל השני זורם זרם I_2. ראינו כי גודל הכוח F, הפועל על קטע באורך ℓ של התיל השני, נתון בעצם על-ידי משוואה (12-1):

$$F = B_1 I_2 \ell$$

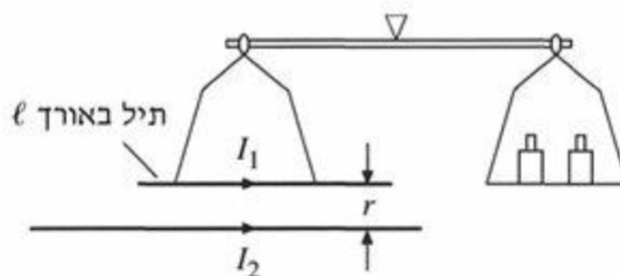
ומכאן נקבל כי

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 I_2 \ell}{r}$$

ניתן להראות כי גודל הכוח, שמפעיל התיל השני על קטע באורך ℓ של התיל הראשון, נתון על-ידי אותה משוואה.

מאזני זרם

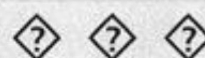
כוחות המשיכה בין תֵּילִים מקבילים, שזורם בהם זרם, ניתנים למדידה באמצעות מאזניים רגישים הנקראים מאזני זרם (איור 13-9).



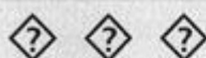
איור 13-9 מאזני זרם

במאזניים אלה – אחת הכפות היא כף מאזניים רגילה; אך במקום הכף השנייה – יש תיל באורך ℓ (למשל, 20 ס״מ). במקביל לתיל זה, ובמרחק ידוע ממנו (r), נמצא תיל ארוך מאוד. כל אחד מהתֵּילִים הוא חלק ממעגל חשמלי, כך שבתֵּילִים זורמים הזרמים I_1 ו-I_2, כפי שרואים באיור 13-9.

מאחר שהזרמים בתֵּילִים הם באותו כיוון, התֵּילִים מושכים זה את זה. מכאן שהתיל העליון נמשך כלפי מטה. כדי לאזן צד זה של המאזניים, מניחים משקולות על הכף שבצד השני. המשקל, הדרוש לאיזון המאזניים, שווה לכוח, שבו מושך התיל הארוך את התיל באורך ℓ.



שאלות חזרה



שאלה 13-4

נסח את הכלל למציאת הכיוון של שדה מגנטי, הנוצר על-ידי תיל ישר וארוך, שזורם בו זרם.

שאלה 13-5

א. נתונים שני תֵיִלים ארוכים, ישרים ומקבילים. בשני התֵיִלים זורם זרם באותו כיוון. האם התֵיִלים מושכים זה את זה, או דוחים זה את זה?

ב. חזור על הסעיף הקודם, אלא שכיווני הזרמים מנוגדים בשני התֵיִלים.

סיכום פרק 13

- השדה המגנטי, הנוצר בנקודה מסוימת על-ידי תיל נושא זרם, הוא סכום השדות המגנטיים, הנוצרים בנקודה זו על-ידי כל אחד מהמטענים, המרכיבים את הזרם.
- גודל השדה המגנטי B – במרחק r מתיל ישר, ארוך מאוד, הנושא זרם I – נתון על-ידי $B=\frac{\mu_0 I}{2\pi r}$. μ_0 הוא קבוע שערכו $4\pi\times10^{-7}$ $\frac{\text{וובר}}{\text{מטר}\times\text{אמפר}}$. במשוואה זו – הזרם נתון באמפרים, המרחק - במטרים, והשדה המגנטי – ביחידות טסלה.
- מהמשוואה $B=\frac{\mu_0 I}{2\pi r}$ ניתן לדעת את גודל השדה המגנטי B, בכל נקודה שמרחקה r מתיל מוליך ישר וארוך מאוד, הנושא זרם I. קווי השדה המגנטי, הנוצרים על-ידי תיל כזה, הם מעגלים, שהתיל נמצא במרכזם.
- קווי השדה מתפזרים ומתרחקים זה מזה, ככל שמתקרבים לקצות הסולנואיד ; ואילו קווי השדה במרכז הסולנואיד מקבילים כמעט לציר הסולנואיד. אם-כן, נסיק כי ניתן ליצור שדה מגנטי חזק בתחום שבתוך הסולנואיד, כך שקווי השדה יהיו מקבילים כמעט לציר הסולנואיד. אם נקפל את הסולנואיד לצורת טבעת, נקבל **טורואיד**.
- גודל השדה המגנטי B, הנוצר בתוך הסולנואיד, תלוי בגודל הזרם I הזורם בסולנואיד, במספר הכריכות N של הסולנואיד ובאורך ℓ של הסולנואיד (האורך מסומן באיור 13-4). ניתן להראות כי $B=\mu_0\frac{NI}{\ell}$.
- גודל הכוח F, שמפעיל תיל ישר וארוך ונושא זרם I_1 – על קטע באורך ℓ של תיל אחר, ישר וארוך ונושא זרם I_2, נתון על-ידי $F=\frac{\mu_0}{2\pi}\cdot\frac{I_1 I_2 \ell}{r}$.

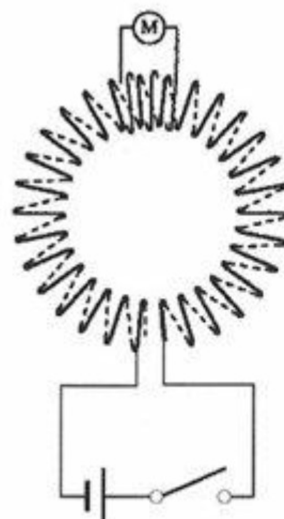
14

התכונות המגנטיות של החומר

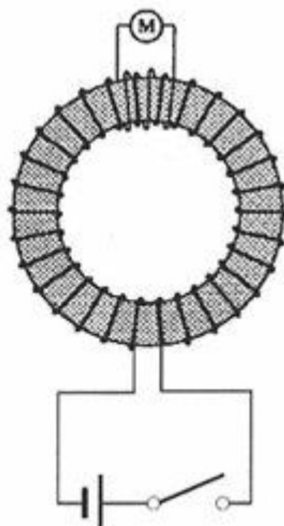
בפרק הקודם עסקנו, בין השאר, בשדות המגנטיים הנוצרים בנקודות שונות במרחב, על-ידי זרמים מוליכים שונים הנושאים זרם, ולמדנו לחשב את השדות המגנטיים הללו. לצורך חישובינו, הנחנו כי המרחב ריק, ואין בו שום חומר.

14.1 היווצרות שדות מגנטיים בחומר

כדי לבדוק את ההשפעה של חומר על השדה המגנטי, ניקח טורואיד, המלופף בצפיפות (איור 14-1א), כך שהשדה המגנטי הנוצר בו – מוגבל לנפח הטורואיד. כמו-כן ניקח טבעת של החומר, שאת השפעתו על השדה המגנטי רוצים לבדוק, ונלפף סביבה את כריכות הטורואיד, כפי שמתואר באיור 14-1ב. התקן כזה נקרא **טבעת רוֹלַנְד**.



א – מדידת השדה המגנטי בטורואיד שאין בו חומר



ב – מדידת השדה המגנטי בטבעת רולנד

איור 14-1 מדידת השדה המגנטי בטורואיד ובטבעת רולנד

כתוצאה מכך שזרם עובר בכריכות טורואיד, נוצר בטורואיד שדה מגנטי. לא נדון כאן בשיטות למדידת שדה מגנטי, אך נניח כי מכשיר המדידה M (איור 14-1), המחובר לטורואיד ולטבעת רולנד, מודד את השדה המגנטי בכל התקן.

תחילה מודדים את השדה המגנטי בטורואיד, שאין בו חומר (איור 14-1א), ולאחר מכן מודדים את השדה המגנטי, הנוצר בטורואיד שיש בו חומר (כלומר, בטבעת רולנד). מתברר כי בגלל הכנסת חומר לחלל הטורואיד, חל שינוי בשדה המגנטי שבתוך הטורואיד.

ראינו כי שדות מגנטיים נוצרים על-ידי זרמים. אם לאחר הכנסת חומר – חל שינוי בשדה המגנטי שבתוך הטורואיד, נוכל להסיק מכך כי נוכחות החומר בחלל הטורואיד, מלוּוָה בזרמים שמקורם בחומר. נוכל להבין תופעה זו, על-פי מודל אמפר, שלמדנו בפרק 11.

ובכן, כאשר זורם זרם בטורואיד שבאיור 14-1ב, נוצר שדה מגנטי בתוך הטורואיד. שדה מגנטי זה גורם לכך, שהאלקטרונים בתוך החומר ינועו באותו כיוון, כלומר: הזרמים בעניבות הזרם בחומר - יזרמו באותו כיוון. על פי מודל אמפר, סכום הזרמים האלה הוא זרם במשטח החיצוני של החומר. זרם זה נקרא **הזרם המשטחי של אמפר**.

הזרם המשטחי של אמפר (בדומה לזרם החיצוני בטורואיד) גורם להיווצרות שדה מגנטי בתוך התחום המוגבל על-ידי הטורואיד. זרם משטחי זה גורם לכך שהשדה המגנטי, הנמדד בטבעת רולנד, שונה מהשדה המגנטי בטורואיד, שאין בו חומר.

נחזור ונדגיש כי זהו תיאור פשטני. יש חומרים, שהתהליך המתרחש בהם - כתוצאה מהפעלת שדה מגנטי - מסובך בהרבה מהתיאור שהבאנו כאן. על כך נדון בהמשך.

14.2 עוצמת השדה המגנטי

על-פי הסברנו לגבי השדה המגנטי בטבעת רולנד (איור 14-1ב), נוכל להסיק כי השדה המגנטי בטורואיד (וכן בסולנואיד) שֶׁיֵּש בו חומר, נוצר על-ידי שני זרמים:

- הזרם החיצוני, הזורם בטורואיד (או בסולנואיד);
- הזרם המשטחי של אמפר, הזורם בחומר.

בגלל הזרם החיצוני, הזורם בטורואיד הריק, נוצר שדה מגנטי. נסמן שדה מגנטי זה על-ידי B_0. לשדה מגנטי זה מקובל לשייך גודל מיוחד, הנקרא **עוצמת השדה המגנטי**. גודל זה מסומן על-ידי H. הקשר בין עוצמת השדה המגנטי, לבין השדה המגנטי B_0, שהוא השדה המגנטי בריק, הוא

$$B_0 = \mu_0 H \qquad (14\text{-}1)$$

B_0 – השדה המגנטי בריק

μ_0 – חלחלות הריק (להלן נדון בגודל זה)

H – עוצמת השדה המגנטי

ראינו כי השדה המגנטי, הנוצר על-ידי הזרם החיצוני בטורואיד, נתון על-ידי

$$B_0 = \mu_0 \frac{NI}{\ell} \qquad (14\text{-}2)$$

מכאן נסיק כי H, עוצמת השדה המגנטי הנוצר בטורואיד, נתון על-ידי

$$H = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{NI}{\ell} \qquad (14\text{-}3)$$

היחידות של עוצמת השדה המגנטי הן $\frac{\text{אמפר} \cdot \text{כריכות}}{\text{מטר}}$ הן מסומנות על-ידי $\frac{\text{AT}}{\text{m}}$.
לפעמים משמיטים את ה-T בסימון היחידות של עוצמת השדה המגנטי, והיחידות של H נרשמות כך: $\frac{\text{A}}{\text{m}}$.

כאשר יש חומר בטורואיד (כלומר, הטורואיד אינו ריק), השדה המגנטי B נוצר בתוך הטורואיד בגלל הזרם החיצוני ובגלל הזרם המשטחי של אמפר. הקשר בין השדה המגנטי B לבין עוצמת השדה המגנטי H הוא

$$B = \mu H \qquad (14\text{-}4)$$

B – שדה מגנטי

μ – חלחלות

μ נקראת **חלחלות מגנטית** (או **חדירות מגנטית**). כאמור, בריק מקבלים כי $B_0 = \mu_0 H$. אם-כן, μ_0 נקראת **החלחלות המגנטית** (או **החדירות המגנטית**) **של הריק**. היחס בין החלחלות המגנטית μ בחומר, לבין חלחלות הריק μ_0, נקרא **חלחלות יחסית**, ומסמנים אותה על-ידי μ_r, כלומר:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \qquad (14\text{-}5)$$

ומכאן:

$$\mu = \mu_r \mu_0 \qquad (14\text{-}6)$$

החומרים, שהחלחלות היחסית שלהם גדולה בהרבה מ-1, נקראים **חומרים פרומגנטיים**. החומר, המוכר ביותר בקבוצה זו, הוא הברזל. לקבוצה זו שייכים גם הניקל והקובלט. נוסף על כך, יש קבוצה גדולה של סגסוגות בעלות תכונות פרומגנטיות.

החלחלות היחסית של חומרים פרומגנטיים – אינה קבועה, אלא משתנה עם שינוי עוצמת השדה המגנטי H. התלות של החלחלות היחסית ב-H – יכולה להיות מסובכת למדי בחומרים פרומגנטיים, כפי שנוכל להסיק בהמשך.

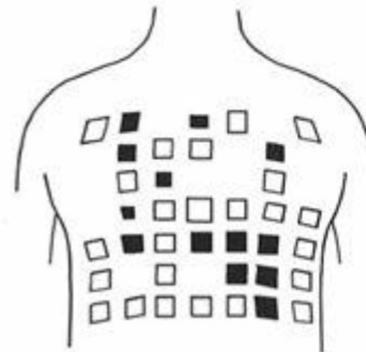
החלחלות היחסית של חומרים פרומגנטיים – יכולה להיות גדולה ביותר, והיא מגיעה לפעמים למאות. על-ידי הפעלת שדה מגנטי חיצוני על חומרים כאלה, ניתן – באמצעות התקן מתאים - לקבל שדות מגנטיים גדולים מאוד.

כמה חומצת ברזל שאף אדם לתוך ריאותיו?

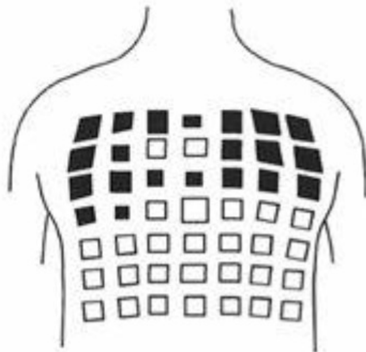
לתופעת המגנוט של חומרים פרומגנטיים – יש שימושים ברפואה. ניתן לגלות חומרים פרומגנטיים בגוף, על-ידי כך שממגנטים אותם באמצעות שדה מגנטי חזק, ולאחר מכן מודדים את השדות המגנטיים, הנוצרים על-ידי החומרים הפרומגנטיים.

באיור 14-2 מתוארים השדות המגנטיים המתגלים בגופם של בני-אדם, כאשר הגוף מכיל תחמוצת ברזל. באיור זה, שטחו של כל ריבוע שחור נמצא ביחס ישר לגודל השדה המגנטי הקיים באמצע הריבוע.

באיור 14-2א מתואר חלק מגופו של אדם, שאכל שעועית מקופסת שימורים, וקיבתו מכילה 0.0004 גרמים של חומצת ברזל. באיור 14-2ב מתואר חלק מגופו של אדם, שעסק בריתוך, ובריאותיו יש 0.0005 גרם של חומצת ברזל.



א – גודל השדה המגנטי בגופו של אדם, שאכל שעועית מקופסת שימורים



ב – גודל השדה המגנטי בגופו של אדם, שריתך באמצעות קשת חשמלית, ושאף לריאותיו גז המכיל חומצת ברזל

איור 14-2 השדות המגנטיים המתגלים כאשר הגוף מכיל תחמוצת ברזל

לא כל החומרים הם פרומגנטיים. למעשה, יש חומרים רבים מאוד, שאינם פרומגנטיים. לחומרים, שהחלחלות היחסית שלהם – **גדולה** רק במקצת מ-1, קוראים **חומרים פאראמגנטיים** (paramagnetic). בטבלה שלהלן נתונים חומרים פאראמגנטיים אחדים והחלחלויות היחסיות שלהם – בטמפרטורת החדר:

החומר	החלחלות היחסית שלו (בטמפרטורת החדר)
אוויר	1.0000004
אלומיניום	1.000023
פלטינה	1.00025

שינויי טמפרטורה של החומרים הפאראמגנטיים – גורמים לשינויים בתכונות המגנטיות שלהם. לכן יש לציין את הטמפרטורה, שבה נמדדת חלחלות יחסית של חומר כזה.

לחומרים, שהחלחלות היחסית שלהם **קטנה** רק במקצת מ-1, קוראים **חומרים דיאמגנטיים** (diamagnetic). בטבלה שלהלן נתונים חומרים פאראמגנטיים אחדים והחלחלויות היחסיות שלהם – בטמפרטורת החדר :

החומר	**החלחלות היחסית שלו (בטמפרטורת החדר)**
מים	0.99999
ביסמוט	0.9998
כסף	0.99998

שאלות חזרה

שאלה 14-1

מהו הזרם המשטחי של אמפר? (סמן את התשובה הנכונה).

א. הזרם, ביחידות אמפר, הזורם במשטח של חתך מוליך, הנמצא במעגל חשמלי ומקיים את חוק אום.

ב. הזרם, הזורם במשטח החיצוני של חומרים מסוימים, ואשר מתקבל כתוצאה מהפעלת שדה מגנטי.

ג. הזרם הזורם במשטח הכריכות של טורואיד שאין בו חומר, וגורם לשדה מגנטי בטורואיד.

ד. הזרם הגורם להיווצרות שדה מגנטי מחוץ לתחום המוגבל על-ידי הטורואיד.

שאלה 14-2

סמן את הטענה הנכונה לגבי טורואיד, שיש בו חומר פרומגנטי.

א. הזרם החיצוני, הזורם בטורואיד, אינו שותף ליצירת השדה המגנטי בטורואיד.

ב. הזרם המשטחי של אמפר, הזורם בחומר, אינו שותף ליצירת השדה המגנטי בטורואיד.

ג. הן הזרם החיצוני, הזורם בטורואיד, והן הזרם המשטחי של אמפר - שותפים ביצירת השדה המגנטי בטורואיד.

שאלה 14-3

הקשר בין B_f, השדה המגנטי בריק, לבין עוצמת השדה המגנטי H הוא

א. $B_f = \mu_0 H$

ב. $B_f = H$

ג. $B_f = \frac{H}{\mu_0}$

ד. $B_f = \frac{\mu_0}{H}$

שאלה 14-4

H, עוצמת השדה המגנטי הנוצר בטורואיד, נתונה על-ידי

א. $H = \frac{\mu_0}{NI\ell}$

ב. $H = \frac{NI}{\ell}$

ג. $H = \frac{NI\ell}{\mu_0}$

ד. $H = \frac{\mu_0}{NI\ell}$

שאלה 14-5

סמן את כל הביטויים של היחידות הנכונות של עוצמת השדה המגנטי.

א. $\frac{\text{אמפר} \cdot \text{כריכות}}{\text{מטר}}$

ב. $\frac{\text{אמפר}}{\text{מטר}}$

ג. $\frac{\text{מטר}}{\text{אמפר} \cdot \text{כריכות}}$

ד. $\frac{\text{מטר}}{\text{אמפר}}$

שאלה 14-6

סמן את המשוואה הנכונה.

א. $\mu = \mu_r$

ב. $\mu = \mu_0$

ג. $\mu = \mu_r \mu_0$

ד. $\mu = \frac{\mu_r}{\mu_0}$

ה. $\mu = \frac{\mu_0}{\mu_r}$

שאלה 14-7

סמן את הטענות הנכונות.

א. באמצעות המודל של אמפר, מסבירים באופן מלא את ההיווצרות של שדה מגנטי בחומר פרומגנטי.

ב. כאשר חומר פרומגנטי אינו נמצא בשדה מגנטי חיצוני, אין בחומר תחומים מגנטיים.

ג. כאשר חומר פרומגנטי לא נמצא בשדה מגנטי חיצוני, השדות של התחומים המגנטיים – אינם מסודרים.

ד. כשמפעילים שדה מגנטי חיצוני על חומר פרומגנטי, השדות המגנטיים הפנימיים מחזקים את השדה החיצוני.

14.3 אלקטרומגנט וכוח המשיכה שלו

כאמור, מגנטים קבועים מצויים בטבע בצורה חופשית, אך ניתן למגנט חומר פרומגנטי (כדוגמת ברזל), ולייצר מגנט גם באופן מלאכותי. ואמנם, ייצור מגנטים מלאכותיים הוא תהליך נפוץ. כוח המשיכה וזמן הקיום של התכונות המגנטיות של מגנטים מלאכותיים, תלויים בשיטת הייצור שלהם ובחומרים, שמהם מייצרים את המגנטים המלאכותיים.

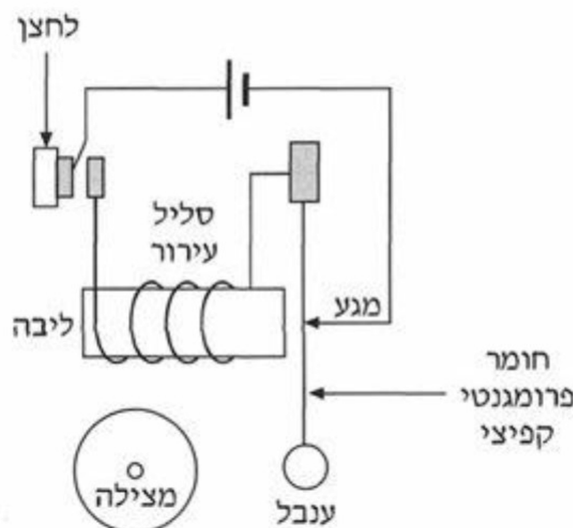
השיטה המועדפת לייצור מגנט מלאכותי, היא ללפף סליל על חומר הניתן למגנוט, ואשר אותו אנו רוצים למגנט, והעברת זרם חשמלי בסליל זה. הסליל, שבו עובר הזרם, נקרא סליל עירור; והמגנט המלאכותי, הנוצר בשיטה כזאת, נקרא **אלקטרומגנט**.

לא תמיד אנו מעוניינים במגנטים מלאכותיים קבועים. לפעמים דרוש לנו דווקא מגנט מלאכותי, שישמש כמגנט, כל עוד זורם זרם בסליל חשמלי; ויפסיק להיות מגנט - עם הפסקת הזרם. נדגים זאת בהמשך.

לאלקטרומגנטים יש שימושים רבים. אלקטרומגנטים ענקיים משמשים כמנופים רבי-עוצמה להעברת גרוטאות ברזל ממקום למקום. אלקטרומגנטים קטנים מצויים, למשל, באפרכסת הטלפון ובפעמון חשמלי בכניסה לדירה.

פעמון חשמלי (בכניסה לדירה, למשל)

אלקטרומגנט מאפשר פתיחה וסגירה של מעגל חשמלי, ולכן משתמשים באלקטרומגנט כחלק עיקרי בפעמון החשמלי, המצוי בכניסה לדירות רבות. באיור 14-3 מתואר תרשים של פעמון חשמלי.

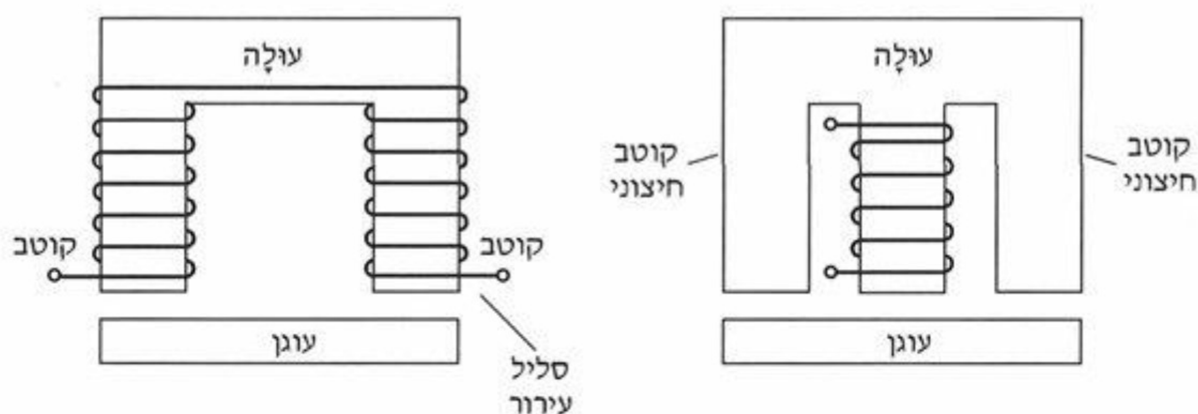


איור 14-3 תרשים של פעמון חשמלי, הנמצא בכניסה לדירה

כאשר לוחצים על הלחצן, עובר זרם בסליל העירור שבפעמון. כתוצאה מכך נוצר שדה מגנטי בליבה, העשויה מחומר פרומגנטי. שדה מגנטי זה גורם לכך, שהחומר הפרומגנטי הקפיצי נמשך לליבה, והענבל מכה במצילה.

כתוצאה מתנועת החומר הפרומגנטי הקפיצי לכיוון הליבה, חל נתק בנקודת המגע של המעגל החשמלי, והזרם במעגל מפסיק לזרום. מכאן שגם בסליל העירור לא זורם זרם, ואין שדה מגנטי, שימשוך את החומר הפרומגנטי הקפיצי. אם-כן, חומר זה יחזור למצבו הקודם. כל זמן שהלחצן לחוץ, התהליך חוזר על עצמו, והפעמון שב ומצלצל.

שני סוגים נפוצים מאוד של אלקטרומגנטים – הם אלקטרומגנט פרסה ואלקטרומגנט דמוי E (ובקיצור: אלקטרומגנט *E*), כפי שרואים באיור 14-4. כל אחד מהם מורכב משני חלקים פרומגנטיים (לאו דווקא מאותו חומר): עולה ועוגן. על העולה מלופף סליל העירור. כשזורם זרם בסליל העירור, נוצר שדה מגנטי בליבה, והעוגן נמשך אל העולה.



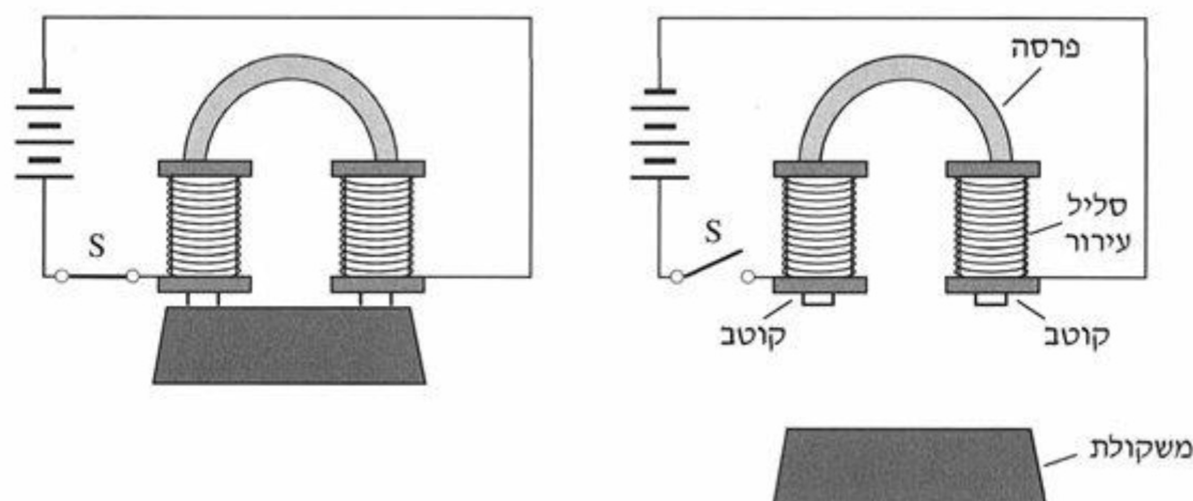
א – אלקטרומגנט E ב – אלקטרומגנט פרסה

איור 14-4 שני סוגים עיקריים של אלקטרומגנטים

כוח המשיכה של אלקטרומגנט

באיור 14-5 מתואר אלקטרומגנט פרסה בעל שני סלילים. האלקטרומגנט מחובר למקור מתח. בין קוטבי האלקטרומגנט נמצאת משקולת ברזל. כאשר סוגרים את המתג S, זורם זרם בסליל העירור, והפרסה הופכת למגנט. כתוצאה מכך, המשקולת נמשכת אל האלקטרומגנט ונצמדת לפרסה.

כוח המשיכה המגנטי, שמפעיל האלקטרומגנט, מצוי בעיקר באזור הקטבים, כי השטף המגנטי שם הוא החזק ביותר.

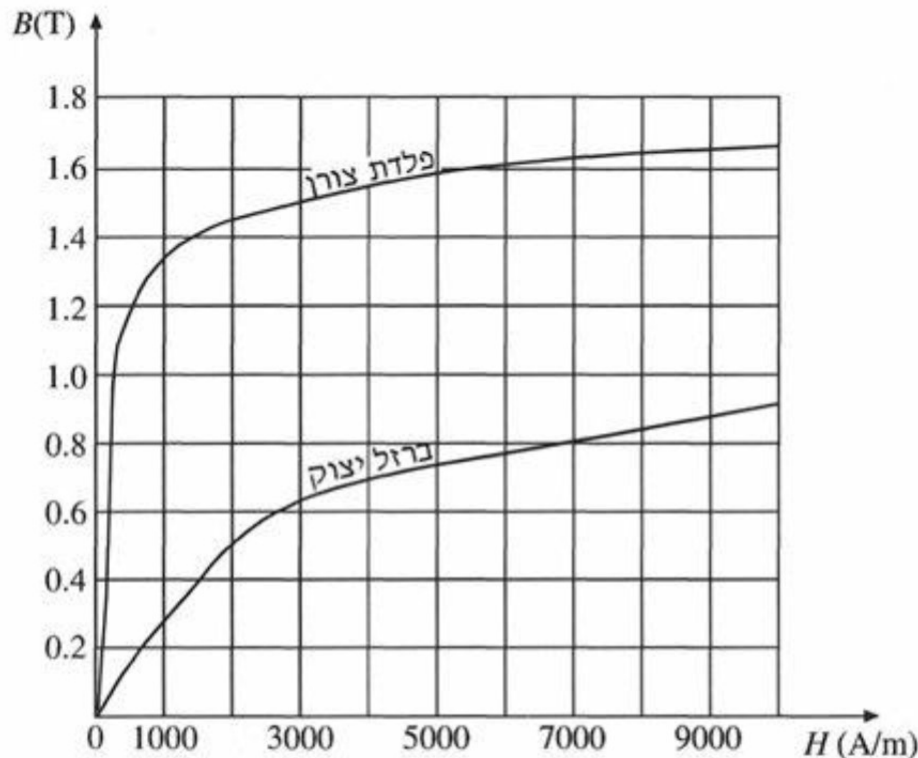


איור 14-5 אלקטרומגנט פרסה להרמת משאות

14.4 עקום המגנוט

כאשר מעלים את עוצמת השדה המגנטי H, הפועל על חומר פרומגנטי, הדבר גורם להגברת השדה המגנטי B. כתוצאה מכך, תחומים רבים יותר ויותר מסתדרים בכיוון השדה. עצם התהליך הזה מגביר שוב את השדה B, הגורם לתחומים נוספים להסתדר בכיוון השדה, והתהליך חוזר על עצמו. כאשר רוב התחומים בחומר מסודרים בכיוון השדה, החומר מגיע לרוויה מגנטית. כלומר, גם אם נמשיך להעלות את עוצמת השדה H, השדה המגנטי B יישאר קבוע, או ישתנה רק במעט.

מקובל לתאר את תלות השדה המגנטי B בעוצמת השדה H – באמצעות גרף (איור 14-6). גרף כזה נקרא בשם **עקום המגנוט** של החומר. באיור 14-6 נתונים עקומי מגנוט של שני חומרים פרומגנטיים : ברזל יצוק ופלדת צורן.



איור 14-6 עקומי המגנוט של ברזל יצוק ופלדת צורן

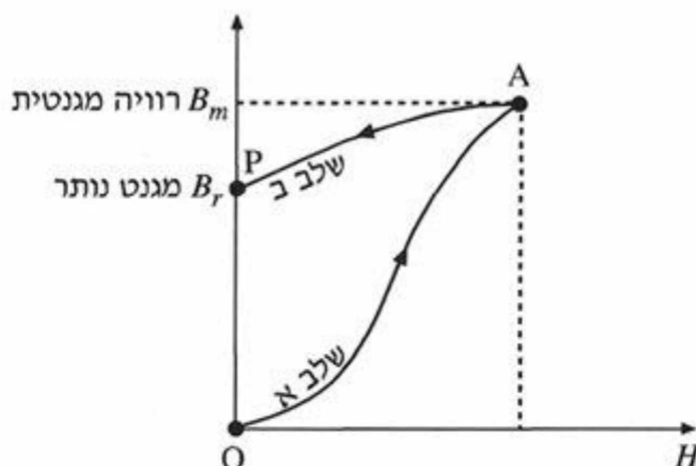
14.5 החשל המגנטי

נתון טורואיד ובו חומר פרומגנטי בלתי ממוגנט. מחברים את הטורואיד למקור מתח. עם החיבור, יתחיל לזרום בסלילי הטורואיד זרם I. ניתן להראות כי עוצמת השדה המגנטי H, הנוצרת על-ידי זרם זה, נתונה על-ידי המשוואה

$$H = \frac{NI}{L} \qquad (14\text{-}7)$$

ממשוואה זו אנו לומדים, כי על-ידי הגדלת הזרם I בסלילי הטורואיד, ניתן להגדיל את עוצמת השדה המגנטי H. הזרם היוצר את עוצמת השדה המגנטי H, וגורם בכך למגנוט החומר הפרומגנטי, נקרא **זרם המגנוט**. נניח שעל-ידי הגדלה הדרגתית של זרם המגנוט – נגדיל את H מאפס עד ערך מסוים. נמדוד את ערכי השדה המגנטי B, ונרשום את הערכים B ו-H, ואת היחס $\frac{B}{H}$.

בתחילה, עם עליית זרם המגנוט, נמצא כי עם הגדלת H, גדל גם B – עד ש-B מגיע לערך מְרַבִּי מסוים, שאותו נסמן על-ידי B_m. ואז, כאמור, החומר מגיע לרוויה מגנטית. בגרף המופיע באיור 14-7, העקום OA (שלב א) מתאר את עליית השדה B, כאשר מגדילים את H מאפס, ועד לערך שבו מגיע החומר לרוויה מגנטית. הנקודה A בגרף מציינת את ערכי B ו-H במצב זה.



איור 14-7 עקום החשל המגנטי

כעת נפחית בהדרגה את זרם המגנוט. היינו מצפים, שעקום המגנוט יחזור על עקבותיו לכיוון ראשית הצירים. אולם, עם הקטנת זרם המגנוט, ערך השדה B משתנה על-פי העקום AP (איור 14-7), וכאשר זרם המגנוט יורד לאפס, עקום המגנוט מגיע לנקודה P.

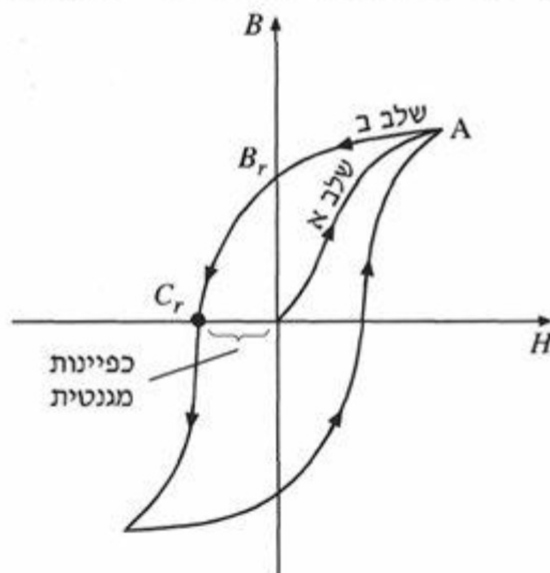
מגנוט נותר

מעקום המגנוט אנו למדים, כי גם לאחר שנותק זרם המגנוט, נותר שדה מגנטי בחומר הפרומגנטי. לשדה המגנטי שנותר – קוראים **מגנוט נותר***, והוא מסומן בדרך-כלל על-ידי B_r. תכונה זו של החומר הפרומגנטי, המתבטאת בכך שקיים פיגור בירידת B ביחס לירידת H, נקראת **חשל** (היסטרזיס).

כפיינות מגנטית

נחזור לנקודה P בגרף שבאיור 14-7, כלומר: הנקודה שבה נותק זרם המגנוט.

עתה נפעיל זרם מגנוט בכיוון הפוך. הדבר יגרום להיווצרות עוצמת שדה מגנטי H, שכיוונו הפוך לזה, שנוצר קודם לכן. אם נגדיל את זרם המגנוט בכיוון החדש, המגנוט הנותר יילך ויקטן (כלומר, היווצרות שדה מגנטי בכיוון ההפוך – תגרום להחלשת המגנוט הנותר), עד שיגיע לאפס (בנקודה C_r באיור 14-8). לאחר מכן שוב יגדל השדה המגנטי B – עם גידול עוצמת השדה המגנטי H, אולם הפעם בכיוון הפוך, כמתואר באיור 14-8.



איור 14-8 עניבת החשל המגנטי

לנקודה C_r יש חשיבות רבה. שיעורה האופקי של נקודה זו מציין את עוצמת השדה המגנטי, הנדרשת כדי להחזיר את השדה המגנטי לאפס. שיעור אופקי זה נקרא **כפיינות מגנטית**.

* מגנוט נותר נקרא גם **מותירות מגנטית**, וכן **מגנטיות שיורית**.

עניבת החשל

על-ידי כך שמחלישים את זרם המגנוט, ולאחר מכן הופכים את כיוונו, ניתן לחזור לנקודה A (איור 14-8). בצורה זו מתקבל עקום חשל סגור, הנקרא **עניבת החשל** או **עקום החשל** (או : **עניבת היסטרזיס**).

כאשר חומר עובר את התהליך המתואר על-ידי עניבת החשל, נוהגים לומר כי הוא "עובר דרך עניבת החשל שלו". תהליך זה נקרא גם בשם **מחזור מגנטי**. במחזור כזה ממגנטים את החומר כך, שהזרם הוא פעם בכיוון אחד, ואחר-כך בכיוון הפוך.

שאלות חזרה

שאלה 14-8

כאשר רוב התחומים בחומר פרומגנטי מסודרים בכיוון השדה המגנטי, החומר מגיע ל ...

א. עקום המגנוט
ב. רוויה מגנטית
ג. זרם המגנוט
ד. חשל (היסטרזיס)

שאלה 14-9

"עקום המגנוט של חומר פרומגנטי, הוא גרף המתאר את תלות השדה המגנטי B בעוצמת השדה המגנטי H, הפועל על החומר הפרומגנטי." נכון או לא?

שאלה 14-10

גם לאחר שמנתקים את זרם המגנוט, יש עדיין שדה מגנטי בחומר הפרומגנטי. שדה מגנטי זה נקרא ...

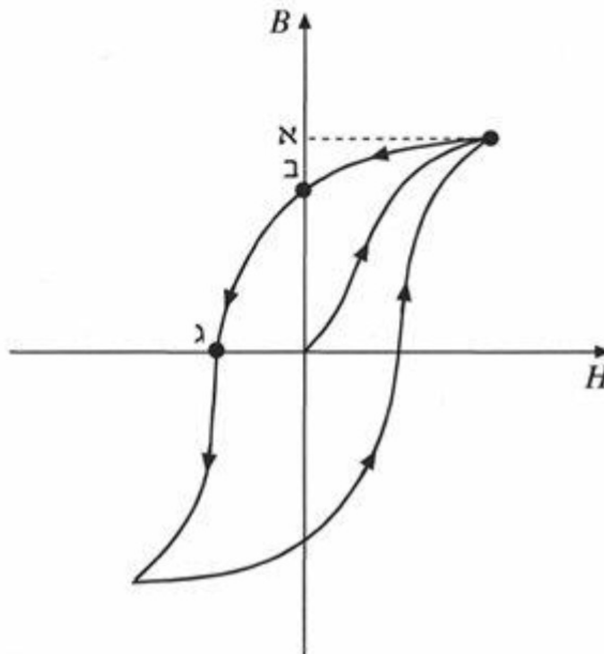
א. כפיינות מגנטית
ב. מגנוט נותר
ג. זרם מגנוט
ד. עקום מגנוט
ה. עניבת החשל
ו. רוויה מגנטית

שאלה 14-11

מהי כפיינות מגנטית? לצורך התשובה, היעזר בגרף של עניבת החשל המגנטי.

שאלה 14-12

באיור 14-9 נתונה עניבת החשל המגנטי.
רשום את שם הגודל המתאים ליד כל אות עברית.



איור 14-9 עניבת החשל המגנטי

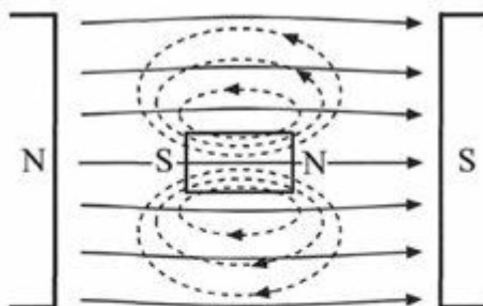
שאלה 14-13

נתון חומר פרומגנטי, העובר את התהליך, המתואר על-ידי עניבת החשל שלו. תהליך זה נקרא ...

א. כפיינות מגנטית	ב. מגנוט נותר
ג. זרם מגנוט	ד. עקום מגנוט
ה. מחזור מגנטי	ו. רוויה מגנטית

14.6 סיכוך מגנטי

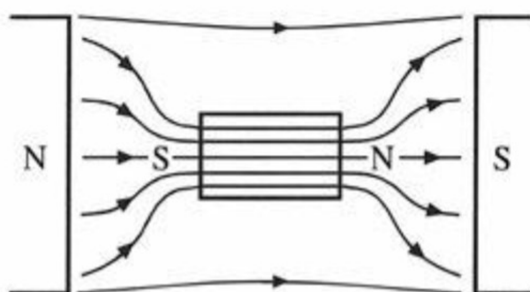
כזכור, חומרים פרומגנטיים יוצרים שדות מגנטיים חזקים בהשפעת שדה מגנטי חיצוני. אפשר לנצל זאת ליצירת **סיכוך מגנטי**, כלומר, כדי להגן על גוף מפני כניסת שטף מגנטי חזק לתוכו. כדי להבין כיצד פועל הסיכוך, נתבונן באיור 14-10.



איור 14-10 פיסת ברזל בתוך שדה מגנטי קבוע

באיור זה מתוארת פיסת ברזל, שהוכנסה לתוך שדה מגנטי קבוע, הנוצר בין שני קטבים של מגנט חזק. כתוצאה מכך שהברזל מצוי בשדה מגנטי חיצוני, הברזל עצמו יוצר שדה מגנטי. כפי שראינו, השדה – הנוצר על-ידי פיסת הברזל – דומה לשדה הנוצר על-ידי סולנואיד נושא זרם. קווי השדה יהיו אפוא הקווים המרוסקים שבאיור 14-10.

בתוך פיסת הברזל – קווי שדה אלה הם בכיוון קווי השדה המקורי, ולכן בתוך פיסת הברזל נוצר שדה מגנטי חזק. לעומת זאת, משני צידיה של פיסת הברזל – כיוון קווי השדה, שיוצרת פיסת הברזל, מנוגד לכיוון קווי השדה המקורי, ולכן באזורים אלה השדה המגנטי **נחלש**. התוצאה הסופית של הכנסת פיסת ברזל בין קוטבי מגנט – היא היווצרות שדה מגנטי חזק בתוך פיסת הברזל, ושדה חלש – משני צידיה. מצב זה מתואר באיור 14-11.



איור 14-11 התוצאה של הכנסת פיסת ברזל לשדה מגנטי קבוע היא מיקוד קווי השדה במוט

אנו רואים אפוא שכאשר מכניסים חומר פרומגנטי לשדה מגנטי, קווי השדה מתרכזים בתוך החומר הפרומגנטי, וסביבתו נשארת, למעשה, חופשייה מקווי שדה.

בתופעה זו משתמשים לשם יצירת סיכוך מגנטי. לדוגמה, בשעוני יד רבים רשום "anti magnetic". פירוש הדבר, שאפשר להכניס את השעון לשדה מגנטי ללא חשש. ואכן, אם נכניס שעון כזה לשדה מגנטי, נראה כי לא תחול הפרעה במנגנון השעון, אף-על-פי שחלקיו הפנימיים עשויים חומרים פרומגנטיים. שעונים אלו מוגנים באמצעות סיכוך מגנטי, הנוצר על-ידי הכנסתם לתוך גוף סוכך, העשוי חומר פרומגנטי בעל חלחלות מגנטית גבוהה. השטף החיצוני יעבור ברובו הגדול דרך הגוף הסוכך, שהחלחלות שלו גבוהה מזו של הגוף המוגן (איור 14-12), וכמעט שלא יחדור לגוף המוגן.



איור 14-12 סיכוך מגנטי

סיכוך מגנטי מצוי לא רק בשעונים. מכשירים חשמליים או ממסרים רגישים, הנתונים להשפעת שדה מגנטי חיצוני (לדוגמה, בסביבתם של מחוללים חשמליים), זקוקים אף הם לאמצעי הגנה זה.

סיכום פרק 14

- בגלל הכנסת חומר לחלל טורואיד, חל שינוי בשדה המגנטי שבתוך הטורואיד. נוכחות החומר בחלל הטורואיד, מלוּוָה בזרמים שמקורם בחומר. הזרם המשטחי של אמפר (בדומה לזרם החיצוני בטורואיד) גורם להיווצרות שדה מגנטי בתוך התחום המוגבל על-ידי הטורואיד.

- השדה המגנטי בטורואיד (וכן בסולנואיד) שֶׁיֵּש בו חומר, נוצר על-ידי שני זרמים: הזרם החיצוני, הזורם בטורואיד (או בסולנואיד); והזרם המשטחי של אמפר, הזורם בחומר.

- לשדה מגנטי זה מקובל לשייך גודל מיוחד, הנקרא **עוצמת השדה המגנטי**. גודל זה מסומן על-ידי H. הקשר בין עוצמת השדה המגנטי, לבין השדה המגנטי B_0, שהוא השדה המגנטי בריק, הוא $B_0 = \mu_0 H$. כאשר B_0 – השדה המגנטי בריק; μ_0 – חלחלות הריק.

- H, עוצמת השדה המגנטי הנוצר בטורואיד, נתון על-ידי $H = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{NI}{\ell}$.

- היחידות של עוצמת השדה המגנטי הן אמפר-כריכות למטר, והן מסומנות על-ידי $\frac{AT}{m}$. לפעמים משמיטים את ה-T בסימון היחידות של עוצמת השדה המגנטי, והיחידות של H נרשמות כך: $\frac{A}{m}$.

- הקשר בין השדה המגנטי B לבין עוצמת השדה המגנטי H הוא $B = \mu H$ (B – שדה מגנטי; μ – חלחלות).

- μ נקראת **חלחלות מגנטית** (או **חדירות מגנטית**). μ_0 נקראת **החלחלות המגנטית** (או **החדירות המגנטית**) **של הריק**. היחס בין החלחלות המגנטית μ בחומר, לבין חלחלות הריק μ_0, נקרא **חלחלות יחסית**, ומסמנים אותה על-ידי μ_r, כלומר: $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$.

- החומרים, שהחלחלות היחסית שלהם גדולה בהרבה מ-1, נקראים **חומרים פרומגנטיים**. החומר, המוכר ביותר בקבוצה זו, הוא הברזל. לקבוצה זו שייכים גם הניקל והקובלט. נוסף על כך, יש קבוצה גדולה של סגסוגות בעלות תכונות פרומגנטיות.
- החלחלות היחסית של חומרים פרומגנטיים – אינה קבועה, אלא משתנה עם שינוי עוצמת השדה המגנטי H. התלות של החלחלות היחסית ב-H – יכולה להיות מסובכת למדי בחומרים פרומגנטיים.
- החלחלות היחסית של חומרים פרומגנטיים – יכולה להיות גדולה ביותר, והיא מגיעה לפעמים למאות. על-ידי הפעלת שדה מגנטי חיצוני על חומרים כאלה, ניתן – באמצעות התקן מתאים - לקבל שדות מגנטיים גדולים מאוד.
- לא כל החומרים הם פרומגנטיים. למעשה, יש חומרים רבים מאוד, שאינם פרומגנטיים. לחומרים, שהחלחלות היחסית שלהם – **גדולה** רק במקצת מ-1, קוראים **חומרים פאראמגנטיים** (paramagnetic).
- שינויי טמפרטורה של החומרים הפאראמגנטיים – גורמים לשינויים בתכונות המגנטיות שלהם. לכן יש לציין את הטמפרטורה, שבה נמדדת חלחלות יחסית של חומר כזה.
- לחומרים, שהחלחלות היחסית שלהם **קטנה** רק במקצת מ-1, קוראים **חומרים דיאמגנטיים** (diamagnetic).
- **אלקטרומגנט** הוא מגנט מלאכותי. לאלקטרומגנטים יש שימושים רבים. כוח המשיכה המגנטי, שמפעיל האלקטרומגנט, מצוי בעיקר באזור הקטבים, כי השטף המגנטי שם הוא החזק ביותר.
- כאשר מעלים את עוצמת השדה המגנטי H, הפועל על חומר פרומגנטי, הדבר גורם להגברת השדה המגנטי B. כתוצאה מכך, תחומים רבים יותר ויותר מסתדרים בכיוון השדה. עצם התהליך הזה מגביר שוב את השדה B, הגורם לתחומים נוספים להסתדר בכיוון השדה, והתהליך חוזר על עצמו. כאשר רוב התחומים בחומר מסודרים בכיוון השדה, החומר מגיע לרוויה מגנטית. כלומר, גם אם נמשיך להעלות את עוצמת השדה H, השדה המגנטי B יישאר קבוע, או ישתנה רק במעט.
- מקובל לתאר את תלות השדה המגנטי B בעוצמת השדה H – באמצעות גרף הנקרא בשם **עקום המגנוט** של החומר.

- נתון טורואיד ובו חומר פרומגנטי בלתי ממוגנט. מחברים את הטורואיד למקור מתח. עם החיבור, יתחיל לזרום בסלילי הטורואיד זרם I. עוצמת השדה המגנטי H, הנוצרת על-ידי זרם זה, נתונה על-ידי המשוואה $H = \frac{NI}{L}$. ממשוואה זו אנו לומדים, כי על-ידי הגדלת הזרם I בסלילי הטורואיד, ניתן להגדיל את עוצמת השדה המגנטי H.
- הזרם היוצר את עוצמת השדה המגנטי H, וגורם בכך למגנוט החומר הפרומגנטי, נקרא **זרם המגנוט**.
- עם עליית זרם המגנוט, נמצא כי עם הגדלת H, גדל גם B – עד ש-B מגיע לערך מְרַבִּי מסוים, שאותו נסמן על-ידי B_m. ואז, כאמור, החומר מגיע לרוויה מגנטית.
- מעקום המגנוט אנו למדים, כי גם לאחר שנותק זרם המגנוט, נותר שדה מגנטי בחומר הפרומגנטי. לשדה המגנטי שנותר – קוראים **מגנוט נותר**, והוא מסומן בדרך-כלל על-ידי B_r. תכונה זו של החומר הפרומגנטי, המתבטאת בכך שקיים פיגור בירידת B ביחס לירידת H, נקראת **חשל** (היסטרזיס).
- על-ידי כך שמחלישים את זרם המגנוט, ולאחר מכן הופכים את כיוונו, ניתן לחזור לנקודה ההתחלתית של עניבת החשל. בצורה זו מתקבל עקום חשל סגור, הנקרא **עניבת החשל** או **עקום החשל** (או : **עניבת היסטרזיס**).
- כאשר חומר עובר את התהליך המתואר על-ידי עניבת החשל, נוהגים לומר כי הוא "עובר דרך עניבת החשל שלו". תהליך זה נקרא גם בשם **מחזור מגנטי**. במחזור כזה ממגנטים את החומר כך, שהזרם הוא פעם בכיוון אחד, ואחר-כך בכיוון הפוך.
- עוצמת השדה המגנטי, הנדרשת כדי להחזיר את השדה המגנטי לאפס, נקראת **כפיינות מגנטית**.
- חומרים פרומגנטיים יוצרים שדות מגנטיים חזקים בהשפעת שדה מגנטי חיצוני. אפשר לנצל זאת ליצירת **סיכוך מגנטי**, כלומר, כדי להגן על גוף מפני כניסת שטף מגנטי חזק לתוכו.

תשובות לשאלות

פרק 1

1-1 הגוף טעון

1-2 מטען חיובי

1-3 10 אלקטרונים

1-4 אטום, נייטרון

1-5 אטום הסידן

1-6 ג, ה

1-7 הגופים טעונים במטענים שְׁוֵוי-סימן

1-8 ימשכו

1-10 א. משיכה
ב. שום כוח חשמלי
ג. שום כוח חשמלי
ד. דחייה
ה. דחייה
ו. שום כוח חשמלי

1-11 א. הכוח יקטן פי 16
ב. הכוח יקטן פי 16

1-12 א. פי 2 מאשר בהתחלה
ב. פי 2 מאשר בהתחלה
ג. פי 4 מאשר בהתחלה

1-13 בערך 94,9968 m

1-14 4×10^{-7} C

1-16 א. פי 4 קטן יותר
ב. 5 m
ג. 0.56×10^{-7} C

1-17 $225{,}000\,\frac{\text{N}}{\text{C}}$

פרק 2

2-1 יש צורך; כרוך

2-2 א. יתקרב
ב. לא

2-3 א

2-4 הפרש פוטנציאלים

2-5 לאנודה

2-6 א. $U_{AB} = 4$ V
ב. $U_{BA} = -4$ V
ד. לא במקרה

2-7 גבוה, נמוך, נמוך, גבוה

2-8 90 V

2-9 $22\,\frac{\text{V}}{\text{m}}$

2-10 א. 27.2 V
א. –27.2 V

2-11 א. A ; ב. B ; ג. C ו-D
ד. – א. B ; ב. A ; ג. שוב C ו-D

2-12 5,700 V

2-13 –90,000 V

2-14 א. אפס
ב. $\frac{8kQ}{r^2}$
ג. $\frac{4kQ}{r}$
עוצמת השדה – אפס

2-15 שני המקרים אפשריים

2-17 שוני-סימן

2-18 לא

2-19 השלילית ; החיובית

2-20 ד

2-21 ג

2-22 0.5 A

2-23 80 C

2-24 12 שניות

2-25 11,520 C

2-26 12 שניות

2-27 30,000 μA ; 30 mA

2-28 $5{,}000 \frac{A}{mm^2}$

2-29 קטנה יותר

2-30 א. 0.312 A

ב. $0.0312 \frac{A}{mm^2}$

פרק 3

3-1 ג

3-2 א

3-4 במוליך הראשון

3-5 ב

3-6 10 Ω

3-7 א

3-8 א. למולך ב

ב. התנגדות מוליך ב גדולה

פי 3.5 מהתנגדות מוליך א

3-9 למוליך העבה

3-10 $0.075 \frac{\Omega \times mm^2}{m}$

3-11 א. מוליך 1

ב. מוליך 4

ג. התנגדות מוליך 1 –

0.0005 Ω

התנגדות מוליך 2 –

0.0015 Ω

3-12 5555.6 m

3-13 א. 0.216 Ω

ב. $1.5\ mm^2$

3-14 א. כן

ב. לא

3-15 קטנה ; קטן ; גדול ; נמוכה

3-16 $0.02\ mm^2$

3-17 גדולה יותר

פרק 4

4-1 לא

4-2 כן

4-3 4.465 k Ω ; 4.935 k Ω

4-4 1.08 k Ω ; 1.32 k Ω

פרק 5

5-1 א. לא; ב. לא; ג. לא ;

ד. לא; ה. נכון

5-2 ב

5-3 0.55 A

5-4 220 V

5-5 0.75 A

5-6 0.2 A

5-7 15 Ω

5-10 ג

5-11 א – לא ; ב – לא ; ג – לא

פרק 6

6-1 אנרגיה

6-2 ג, ד

6-3 ג

6-4 2,000 W

6-5 500 W

6-6 50 W

6-7 720,000 J

6-8 1666.7 W

6-9 לדוד ב

6-10 א

6-11 ב, ג

6-12 201 kW

6-13 לנורה

6-14 2,050 W

6-15 88 W

6-16 0.43 A

6-17 227.3 V

6-18 1322.5 Ω

6-19 36 W

6-20 א. הספק תנור א – 3.23 kW
הספק תנור ב – 4.84 kW
ב. הספק תנור א – 2.16 kW
הספק תנור ב – 1.44 Kw

6-22 א. 540,000 J
ב. 0.15 kWh

6-23 10 kWh

6-24 א. 100 MW
ב. 360,000,000,000 J
ג. 100 MWh

6-25 מלחם – 217,800 J
נורה – 290,400 J
תנור – 1,936,000 J

6-26 א. אנרגיה; ב. אנרגיה ;
ג. הספק ; ד. 1,000 ;
ה. 3,600,000

פרק 7

7-1 א – 0
ב – 2

7-2 18 A (יוצא מהצומת)

7-4 ב. 9 A (נכנס לצומת)

7-5 ב, ג, ד

7-6 $I_1 = I_2 + I_3 + I_4$

7-7 סכום המתחים במעגל זה – שווה לאפס (וכן: מתח המקור שווה למתח על הנגד במעגל זה).

7-8 15 V

7-9 2 V

7-10 ג, ד

7-12 ד. 24 V

7-13 ג. 24 V

7-14 א, ג, ד

7-15 אפס

7-16 א. 5 V ; ב. אפס

7-17 א. 1 ; ב. 1

7-18 ג, ה

פרק 8

8-1 א, ד

8-2 לא

8-3 ב

8-4 במעגל טורי אין צמתים

8-5 א. לא ; ב. לא

8-6 נכון

8-7 ה

8-8 99 Ω

8-9 0.12 A

8-10 100 V

8-11 $U_2 = 7V$; $U_1 = 5$ V

8-12 1.5 A

8-13 נכון

8-14 א. צרכן אחד : 1.44 W ;
צרכן שני : 2.16 W
ב. 3.6 W
ג. 3.6 W

8-16 א. 6 Ω
ב. 0.24 W
ג. 2.4 W

8-17 א, ג, ד, ה

8-18 א

8-19 א, ג, ה

8-20 ב. 0.235 A

8-21 א. 2 Ω
ב. 10 Ω

8-22 1.45 Ω

8-23 הספק הצרכן – 2.8 W
הספק הקו – 0.028 W

8-24 ב, ד

8-25 30 Ω

8-26 ג

8-27 ב, ג

8-28 שני נגדים

8-29 א. 60 Ω
ב. 50 mA ; 100 mA
ג. 150 mA

8-30 11.65 Ω

8-31 ב

8-32 א, ב

8-33 א. הזרם בנורה – 0.174 A
הזרם במגהץ – 2.3 A
ב. הספק הנורה – 40 W
הספק המגהץ – 529 W
ג. 569 W

8-34 א. הזרם בנורה – 0.166 A
הזרם במגהץ – 2.2 A
ב. הספק הנורה – 36.6 W
הספק המגהץ – 484 W
ג. 520.6 W

8-35 איור 8-27 – 25 Ω
איור 8-28 – 225 Ω

8-36 א. $5R$; ב. $\frac{R}{5}$; ג. 25

8-37 א

8-38 במקביל; בטור; מקבילי

8-39 לא

8-40 א – 2; ב – 2; ג – 1; ד – 1;
ה – 2; ו – 1

8-41 א – 36 Ω; ב – 8 Ω ; ג – 18 Ω

8-42 ג

8-44 0.5 A

8-45 א. 88 V ; ב. 12.9 W

8-46 ג

8-47 א

8-49 ג

8-50 נכון

8-51 ב

8-52 73.3 V

8-53 פוטנציומטר ; ריאוסטט ;

פוטנציומטר ; ריאוסטט

8-54 ה

8-57 א. 105 Ω ; זו גם התנגדות המעגל.

ב. 17.1 V

8-58 15 V

8-60 א. 4 W ; ב. 13.2 W

ג. 38.1 V

8-61 הספק המקור – 18 Ω

12 Ω – 12 W

8 Ω – 2W

16 Ω – 4 W

8-62 א. 0.3 A ; ב. 40 Ω ; ג. 3.6 W

8-63 א. לעולם לא נכון ; ב. תמיד נכון ; ג. תמיד נכון ; ד. נכון רק בחלק מהמעגלים ; ה. תמיד נכון

8-64 קטנה יותר ; גדולה יותר

8-65 ג

8-66 65.2 מיליון ג'ול

8-67 א. $\frac{1}{3}$ kWh

ב. 1,200,000 J

ג. 1.8 kW

8-68 א. 2.2 kW

ב. 1.32 kW

8-69 75%

8-70 א. נכון ; ב. לא נכון ; ג. נכון ; ד. לא נכון ; ה. לא נכון ; ו. נכון

8-71 25%

8-72 מקלט טלוויזיה – 22.5 kWh

מחשב – 7.2 kWh

תנור חימום – 120 kWh

8-73 א. 80% ; ב. 20%

8-74 א. 16 Ω ; ב. 1.27 W

8-75 א. 8 Ω ; ב. 50%

8-76 א.

$\frac{R_0}{R_S}=$	5	2	1
נצילות	0.83	0.67	0.5

$\frac{R_0}{R_S}=$	0.5	0.2
נצילות	0.33	0.167

ב. 50% ; ג. לא

8-77 א.

$R_s = 0.2\,R_0$	
0.167 W	הספק המעגל
0.139 W	ההספק המועבר לצרכן

$R_s = 0.5\,R_0$	
0.33 W	הספק המעגל
0.22 W	ההספק המועבר לצרכן

$R_s = R_0$	
0.5 W	הספק המעגל
0.25 W	ההספק המועבר לצרכן

	$R_s = 2R_0$
הספק המעגל	0.667 W
ההספק המועבר לצרכן	0.11W

	$R_s = 5R_0$
הספק המעגל	0.833 W
ההספק המועבר לצרכן	0.139W

ב. 0.25 W ; ג. לא

8-78 נמוך ; גבוה

8-79 1. ב, ד ; 2. לא

8-80 א

8-81 ג

8-82 ב

8-83 8.89 V

8-84 12 V

8-85 185.2 mA

8-86 א, ב

8-87 א. 0.58 A ; ב. 5 W

8-88 א. 2 A·h ; ב. 40 A·h

8-89 א. 15 mA ; ב. 89.5 mA

8-91 0.12 Ω ; 4.5 V

פרק 9

9-1 א, ב

9-2 0.27 A

9-3 0.34 A

9-4 א. 0.54 A ; ב. 0.27 A

9-5 א. 2.8 V ; ב. כן

9-6 7.4 W

9-7 0.2 A

9-8 $U_{Th} = 72$ V ; $R_{Th} = 10\ \Omega$

9-9 א. 39.2 mA ; ב. 26.3 Ma

9-10 בנגד 6 Ω לא זורם זרם.

פרק 10

10-1 מתכתיים ; אינם נוגעים ; מבדד

10-2 ג

10-3 ד

10-4 0.136 μF ; 0.000000136 F

10-5 60×10^{-6} C

10-6 50 V

10-7 2.5 μF

10-8 השלילי ; B ; החיובי ; A

10-9 א. U

10-10 א. לא ; ב. לא

10-11 א. 12 V ; ב. 12 V

10-12 א. 0.0044 C ; ב. יקטן פי 4 ;
ג. ללא שינוי

10-13 א – 2 ; ב – 3 ; ג – 1 ; ד – 4

10-14 גדולה ; קטן

10-15 ב

10-16 5.4 μF

10-17 $18.6\times10^{-12}\ \frac{\text{F}}{\text{m}}$

10-18 10.6 pF

10-19 ישר ; ישר ; הפוך

10-20 לא

10-21 א

10-22 א. 10 μF ; ב. 40 μF

10-23 א

10-24 א. בטור ; ב. 6 μF

10-25 4 µF

10-26 א. 1,000 µF ; ב. 10 µF

10-27 א – 2 µF ; ב – 18 µF ;
ג – 9 µF ; ד – 4 µF

10-28 נכון

10-29 א, ד

10-30 ב, ג

10-31

2		4	8
10	0	8	
	0		0.08

10-32 80 µs

10-33 א. 40 ms ; ב. 40 ms ; ג. 8ms

10-34 כן

10-35 נכון

פרק 11

11-1 א. הצפוני ; ב. הצפוני ;
ג. הצפוני

11-2 4

11-3 ב

11-4 אחיד

11-5 נכון

11-6 ב

11-7 ב

11-8 א

11-9 הניצבים

11-10 כל הטענות נכונות

11-11 ב

11-12 ב

11-13 0.0032 Wb

11-14 0.005 T

פרק 12

12-1 0.008 N

12-2 א. לתוך הדף ; ב. אלינו ;
ג. ימינה ; ד. למעלה

12-4 א. ימינה ; ב. שמאלה ;
ג. למטה

12-5 א. אלינו ; ב. לתוך הדף ;
ג. אלינו

פרק 13

13-1 ג

13-2 4×10^{-7} T

13-3 א. 0.00126 T ; 0.00377 T

13-5 א. מושכים ; ב. דוחים

פרק 14

14-1 ב

14-2 ג

14-3 א

14-4 ב

14-5 א, ב

14-6 ג

14-7 ג

14-8 ב

14-9 נכון

14-10 ב

14-12 א – רוויה מגנטית
ב – מגנוט נותר
ג – כפיינות מגנטית

14-13 ה

מפתח עניינים

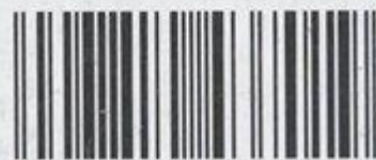
- תחילה רשומים הנושאים והשמות בעברית, אחר-כך באנגלית (ובלטינית), ולבסוף מופיעות אותיות יווניות.
- ר׳ – קיצור המילה ״רְאֵה״.
- הנושאים רשומים בכתיב מלא (עומס – ולא עֹמס; סיכוך – ולא סִכוך; חום – ולא חֹם). אם אתה לא מוצא נושא מסוים, נסה לכתוב אותו בכתיב מלא.

1. עברית

מ

2. אנגלית

3. אותיות יווניות


78-1043701 דאנאקוד